



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



PŘÍPRAVA A CHARAKTERIZACE TEXTILIÍ UPRAVENÝCH POMOCÍ POLYPYROLU ZA ÚČELEM ODSTÍNĚNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství

Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství

Autor práce: **Bc. Adéla Pospíšilová**

Vedoucí práce: Ing. Veronika Šafářová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering



PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF FABRICS TREATED WITH POLYPYRROLE IN ORDER TO SHIELD ELECTROMAGNETIC FIELD

Diploma thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering
Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Bc. Adéla Pospíšilová**
Supervisor: Ing. Veronika Šafářová, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adéla Pospíšilová**
Osobní číslo: **T12000473**
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor: **Produktové inženýrství**
Název tématu: **Příprava a charakterizace textilií upravených pomocí polypyrolu za účelem odstínění elektromagnetického pole**
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši na téma: a) stínění elektromagnetického pole - princip, materiály, požadavky; b) textilní materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí; c) nanášení vodivých polymerů (zejména polypyrolu) na textilie - metody, postupy, parametry procesu; d) možnosti hodnocení elektrické vodivosti a elektromagnetické stínící účinnosti plošných textilií
2. Navrhněte a realizujte experiment nanášení vodivého polymeru polypyrolu na nevodivou textilií s cílem optimalizovat vstupní parametry (teplota lázně, čas polymerizace, koncentrace monomeru) pro získání textilie s danou stínící účinností (cca 10 - 20 dB pro frekvenci 600 - 1500 MHz). Využijte metodiku návrhu a analýzy experimentu.
3. Vyhodnoťte navržený experiment - zhodnoťte existenci či neexistenci vlivu zkoumaných faktorů a jejich společného působení na sledované veličiny. Dále vyhodnoťte, které úrovně rozhodujících kvantitativních znaků vedou k optimální hodnotě odezvy a naopak.
4. Získané výsledky vhodně interpretejte.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Kim M.S., et al. PET fabric/polypyrrole composite with high electrical conductivity for EMI shielding. *Synthetic Metals* 2002, 126(2-3), pp. 233-239.
2. Babu K.F., et al. Polypyrrole microstructure deposited by chemical and electrochemical methods on cotton fabrics. *Synthetic Metals* 2009, 159(13), pp. 1353-1358.
3. Cucchi I., et al. Bio-based conductive composites: Preparation and properties of polypyrrole (PPy)-coated silk fabrics. *Synthetic Metals* 2009, 159(3-4), pp. 246-253.
4. Li. Y., et. al. A flexible strain sensor from polypyrrole-coated fabrics. *Synthetic Metals* 2005, 155(1), pp. 89-94.
5. Hong Y.K., et. al. Electromagnetic interference shielding characteristics of fabric complexes coated with conductive polypyrrole and thermally evaporated Ag. *Current Applied Physics* 2001, 1(6), pp. 439-442.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Veronika Šafářová

Katedra materiálového inženýrství

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jan Grégr

Katedra chemie

Datum zadání diplomové práce:

16. ledna 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

8. ledna 2015

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka



doc. Ing. Vladimír Bajžik, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Velice bych chtěla poděkovat předně své vedoucí diplomové práce **Ing. Veronice Šafářové, Ph.D.** za profesionální přístup, podnětné nápady a velké znalosti v oboru. A hlavně za věnovanou energii a čas, do této práce vložené. Dále bych chtěla poděkovat konzultantu **Ing. Janu Grégrovi** za cenné připomínky hlavně v oblasti chemie a stanovení parametrů procesu. Děkuji paní **Ing. Janě Grabmüllerové** za konzultaci a tvorbu reprezentativních snímků z elektronové mikroskopie a panu prof. **Ing. Jakubovi Wienerovi, Ph.D.** za výstižné připomínky a nápady k této práci. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat **Ing. Marii Kašparové** za konzultaci a přípravu vzorků pomocí laserového přístroje pro experiment. Děkuji své rodině a přátelům, kteří mi byli po celou dobu studia tak potřebnou oporou.

ANOTACE

V současné době je každý z nás vystaven expozici elektromagnetického záření jak doma, tak v zaměstnání a není pochyb o tom, že elektromagnetická pole mají biologické účinky na lidský organismus. Tato skutečnost vytváří podnět k potřebě vývoje textilních struktur s bariérní schopností vůči pronikání elektromagnetických polí. Tato diplomová práce se zabývá přípravou a charakterizací textilií upravených pomocí vodivého polymeru polypyrolu za účelem odstínění elektromagnetického pole. Cílem je za pomoci rozsáhlé experimentální činnosti prostudovat vliv vytipovaných hlavních faktorů (teplota polymerizační lázně, čas polymerizace, koncentrace monomeru) a jejich interakcí na zejména elektromagnetickou stínící účinnost vzorků a následně optimalizovat parametry nanášení vodivého polymeru pro získání textilie s danou stínící účinností (10 – 20 dB při frekvenci 600 MHz – 1,5 GHz). V této práci je využita metodika návrhu a analýzy experimentu.

Klíčová slova: polypyrol, plánování experimentů, modifikace textilie, efektivita elektromagnetické stínící účinnosti.

ANNOTATION

Currently, each of us is exposed to electromagnetic radiation exposure at home and at work and there is no doubt that electromagnetic fields have biological effects on the human body. This fact creates a need for the development of textile structures with barriers ability to penetration of electromagnetic fields. This thesis deals with the preparation and characterization of fabrics treated with conductive polymer polypyrrole in order to shield electromagnetic field. The aim is with the aid extensive experimental work to study influence of selected main factors (temperature of polymerization, polymerization time, monomer concentration), and their interactions in particular electromagnetic shielding effectiveness of the samples and then optimize the parameters of applying the conductive polymer to obtain a fabric with the shielding efficiency (10-20 dB at a frequency of 600 MHz – 1,5 GHz). In this work is used the methodology of design and analysis of experiments.

Key words: polypyrrole, design of experiments, modification of the fabric surface, electromagnetic shielding effectiveness.

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 9 |
| 2 | Elektromagnetické pole a zdravotní rizika | 11 |
| 3 | Teorie stínění elektromagnetického pole | 16 |
| 3.1 | Elektromagnetické pole | 16 |
| 3.2 | Elektromagnetické záření, stínění, kompatibilita | 18 |
| 3.3 | Způsoby hodnocení stínění SE | 20 |
| 3.3.1 | STANDARD ASTM D4935 | 20 |
| 3.3.2 | MIL-STD-285 | 22 |
| 3.3.3 | Klasifikace stínících textilií | 23 |
| 4 | Elektrické vlastnosti materiálů | 24 |
| 4.1 | Elektrická vodivost | 25 |
| 4.2 | Elektrický odpor | 27 |
| 4.3 | Elektrické vlastnosti plošných textilních útvarů | 28 |
| 5 | Možnosti tvorby stínících textilií | 29 |
| 5.1 | Vodivé polymery a jejich dopování | 30 |
| 5.2 | Polypyrol | 33 |
| 5.2.1 | Definice chemické látky | 33 |
| 5.2.2 | Využití polypyrolu nejen v textilním průmyslu | 33 |
| 6 | Literární řešerše | 35 |
| 7 | Plánování experimentů | 38 |
| 8 | Experimentální část | 41 |
| 8.1 | Použité chemické látky | 42 |
| 8.2 | Výběr vhodného substrátu | 44 |
| 8.2.1 | Použité materiály | 44 |
| 8.2.2 | Složení nanášecího roztoku, jeho aplikace | 45 |
| 8.2.3 | Hodnocení elektromagnetického stínění vzorků | 45 |
| 8.2.4 | Shrnutí výsledku | 47 |
| 8.3 | Tvorba elektricky vodivé vrstvy polypyrolem na polyesterovou textilií s využitím metod plánování experimentu | 49 |
| 8.3.1 | Použité materiály | 49 |
| 8.3.2 | Návrh experimentu | 50 |
| 8.3.3 | Nanášení polypyrolu – složení lázně a postup | 51 |
| 8.3.4 | Hodnocení efektivity elektromagnetické stínící účinnosti textilie | 52 |
| 8.3.5 | Hodnocení elektrické vodivosti připravených vzorků | 59 |
| 8.3.6 | Hmotnost nánosu | 62 |
| 8.3.7 | Hodnocení stupně šedi textilie | 63 |
| 8.3.8 | Shrnutí | 68 |
| 8.4 | Ověření metodiky tvorby elektromagneticky stínící textilie | 68 |
| 8.4.1 | Použité materiály, parametry procesu | 69 |
| 8.4.2 | Hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti | 69 |
| 8.4.3 | Shrnutí | 73 |
| 8.5 | Vyhodnocení experimentální části, diskuze | 74 |
| 9 | Závěr | 76 |
| | Použitá literatura | 77 |

1 Úvod

Za elektrosmog je považováno elektromagnetické záření, jehož stále většímu přísunu jsme vystaveni v kteroukoli dobu. Přitom působení přirozených elektromagnetických polí i elektromagnetickému záření různých vlnových délek jsou všechny živé organismy navyklí od prvopočátku vzniku života na naší planetě. Bez zemské magnetosféry, kterou zmíněné geomagnetické pole vytváří, by život na Zemi v současné podobě nebyl vůbec možný. Tzv. „elektrosmog“ tedy představuje neionizující elektromagnetické záření, které je převážně původu nepřirozeného, generované člověkem. Toto vlnění v rozsahu 0–300 GHz, jehož značnou část tvoří záření radiofrekvenční a mikrovlnné vlnění, které zaujímá relativně značnou část elektromagnetického spektra (100 kHz – 300 GHz) zvaného vysokofrekvenční.

Člověk je stále častěji vystavován různým druhům elektromagnetického záření, ať již úmyslnému (vyšetření magnetickou rezonancí, skenovací mikrovlnné zobrazování pro diagnostické či bezpečnostní účely), anebo neúmyslnému, tj. jako průvodnímu jevu při používání elektrických přístrojů a spotřebičů (mobilní telefony, počítače, radiové a TV vysílače i přijímače, radary) [1]. v současné době je na světě umístěno více jak 1,4 milionů základových stanic a toto číslo stále roste.

Jak uvádí článek doc. Vožeha [1] ochrana proti elektrosmogu je přinejmenším otázkou prevence bez ohledu na to, zda je z medicínského hlediska skutečně nezbytná. Minimálně pro rizikové skupiny obyvatel je tedy žádoucí alespoň dílčí ochrana proti vysokofrekvenčnímu neionizujícímu elektromagnetickému záření produkovanému.

Vlastní práce je rozdělena do devíti kapitol. V úvodní kapitole jsou popsána možná zdravotní rizika zapříčiněná elektromagnetickým zářením. V následující kapitole je teoreticky vysvětleno, jakým způsobem elektromagnetické záření vzniká, jakým způsobem se šíří prostorem a jak je pohlcován různými stínícími kryty. Další teoretická kapitola vysvětluje elektrickou vodivost materiálů a její vliv na výslednou efektivitu elektromagnetické stínící účinnosti.

Prozkoumány jsou možnosti elektromagnetického stínění a aplikace vodivých přísad do textilní struktury a zjištěno která chemická látka je vhodná k nanesení vodivé vrstvy s elektromagnetickou stínící účinností na textilií.

Experimentální práce je zaměřená na přípravu a charakterizaci elektricky vodivé textilie s určitým stupněm elektromagnetické stínící účinnosti v rozmezí 10 - 20 dB pro frekvenci elektromagnetického pole 600 MHz – 1,5 GHz. Experimentální práci je

možno rozdělit do tří oblastí. První část se bude týkat volby vhodného textilního substrátu pro nanášení vodivého polymeru. Na základně literární rešerše byly stanoveny vhodné parametry polymerizace, jako je polymerizační teplota, čas a koncentrace monomeru pyrolu. S využitím metodiky plánování experimentů bude v druhém celku experimentu realizována rozsáhlá sada pokusů nanášení vodivého polymeru na textilní substrát s různým nastavením vstupních parametrů. Zde bude prozkoumán vliv jednotlivých proměnných na účinnost elektromagnetického stínění SE v dB a elektrickou vodivost textilního materiálu. Díky experimentální práci bude sledována interakce jednotlivých proměnných a stanovena vhodná doporučení. Provedena bude také optimalizace jednotlivých proměnných za účelem získání materiálu s určitým stupněm stínící účinnosti. V třetím, závěrečném celku experimentální části bude provedeno ověření předem stanovených optimálních hodnot úrovní všech faktorů, které statisticky ovlivňují proces tvorby elektromagneticky stínící textilie. Bude navrženo možné použití nově vytvořené vodivé struktury.

2 Elektromagnetické pole a zdravotní rizika

Celosvětově se pro stále se zvyšující úroveň elektromagnetického pole ujal termín elektrosmog, který se stal obecným pojmem, pod nímž se rozumí postupné enormní zatěžování člověka zdroji záření, na které nebyl po staletí zvyklý.

Pro ochranu obyvatel před expozicí EMP se vědci nemohou dohodnout na bezpečných limitech. Od roku 1990 do roku 2000 platila v ČR vyhláška MZ ČR č. 408/1990 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky elektromagnetického záření, která brala v úvahu netepelné účinky. Od roku 2000 platí nařízení vlády č. 480/2000 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, které připouští tepelné účinky, a autoři se odvolávají na doporučení Rady Evropy, které bylo u nás beze změn převzato jako zákon. Světová zdravotnická organizace WHO nabádá, aby byla veřejnost objektivně informována o možných rizicích spojených s expozicí EMP.

Tabulka 1: Souhrn doporučených limitů ICNIRP. Hodnoty uvedené v tabulce jsou expozice celého těla. [1]

| | Evropský průmyslový kmitočet | | Frekvence základnových stanic mobilních telefonů | | Frekvence mikrovlnných trub |
|-------------------------------------|------------------------------|-----------------|--|------------------|-----------------------------|
| | 50 Hz | 50 Hz | 900 MHz | 1,8 GHz | 2,45 GHz |
| | elektrické pole | magnetické pole | výkonová hustota | | výkonová hustota |
| | kV/m | μT | W/m ² | W/m ² | W/m ² |
| Limit expozice obyvatelstva | 5 | 100 | 4,5 | 9 | 10 |
| Limit profesionální expozice | 10 | 500 | 22,5 | 45 | 50 |

Před přijetím vládního nařízení č. 480/2000 bylo MZČR některými odborníky upozorňováno na to, že přijetím tohoto nařízení se mohou v budoucnu objevit u části populace vážné zdravotní problémy, a to z těchto důvodů:

- limity jsou nastaveny velmi vysoko (dnes již víme, že podle potřeb mobilních telefonů), a to na hodnotu 41 - 58 V/m, což je přepočet výkonové hustoty 4,5 - 9 W/m², viz tab. 1 ICNIRP (Limit expozice pro obyvatelstvo);

- žádná odborná skupina, která se podílela na přípravě doporučení, se nezabývala ochranou proti dlouhodobému působení EMP z hlediska jeho zdravotních důsledků, např. leukemie u dětí;
- nebere se ohled na senzitivní jedince, kteří činí asi 3 % populace, dále děti, staré a nemocné lidi včetně občanů kontraindikovaných na EMP;
- dopady na ekologii. [1]

Faktický obsah elektrosmogu představuje neionizující elektromagnetické záření, které je převážně původu nepřírozeného, generované člověkem. Toto vlnění v rozsahu 0-300 GHz, jehož značnou část tvoří záření radiofrekvenční (RF) a mikrovlnné (MW), zaujímá relativně značnou část elektromagnetického spektra (100 kHz-300 GHz) zvaného vysokofrekvenční (VF). Zejména oblast viditelného světla (390-790 THz) je v tomto srovnání zcela minoritní.

V dokumentech určených k ochraně zdraví se termínem *neionizující záření* zpravidla označují kromě vlastního elektromagnetického záření s frekvencí do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz i statická a nízkofrekvenční elektrická a magnetická pole. Elektromagnetické záření s frekvencí vyšší než $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz patří k záření *ionizujícímu*, schopnému oddělit od elektricky neutrálního atomu elektron. i když všechny elektromagnetické jevy mají stejnou fyzikální podstatu, jejich působení na živou tkáň je velmi rozdílné podle toho, jakou mají frekvenci. Světová zdravotnická organizace (WHO) vydala v roce 2007 výrazné opatření související s rizikem působení nízkofrekvenčního elektromagnetického pole. Příčinou tohoto opatření byly zejména výsledky z epidemiologických studií, které naznačovaly možnou souvislost mezi tímto zářením a např. vážným míšním onemocněním (amyotrofická laterální skleróza), dětskou leukémií a nádory v mozku u dospělých osob. v roce 2011 vydala WHO další opatření, ve kterém se jedná o případná rizika působení VF polí, a to především z důvodu celosvětového masivního užívání mobilních telefonů. v tomto doporučení je vedle stanovených limitních dávek ve tkáních absorbovaného záření *SAR* (udávaných v jednotkách W/kg) na základě doporučení Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (IARC) také ustanovení o zařazení RF elektromagnetického záření do skupiny 2B, potenciálně karcinogenních vlivů na člověka.

Experimentální nálezy zabývající se vlivem elektromagnetických polí na živé organismy, tkáně a buňky jsou často protichůdné, ale některé výsledky pokusu je těžké

zpochybnit. Především se jedná o oxidoredukční procesy, které vlivem elektromag. polí vedou ve tkáních k zvýšené tvorbě volných kyslíkových radikálů, čili k oxidačnímu stresu. To bylo zjištěno především při expozici nízkofrekvenčními poli. Podobně mohou působit avšak i pole vysokofrekvenční. Na buněčné a sub-buněčné úrovni pak tyto procesy mohou vést k narušení chemických vazeb mezi atomy, poškození biologických membrán, a při zablokování vlastních antioxidačních systémů k následné i genotoxicky způsobené (vlivem na DNA) destrukci buněk. Experimentálně to bylo prokázáno na nižší živočišné úrovni (červi), tak i u savců (laboratorní potkani). Zde bylo také prokázáno, že uvedený cyto- a genotoxický efekt se více projevil u mláďat ve srovnání s dospělými jedinci.

Protichůdné názory vznikají i ve vztahu srovnání tepelných a netepelných účinků zejména RF polí. Tepelný účinek zapříčiní vzrůst teploty, generovaný přeměnou energie těchto polí, a to v důsledku vibrací atomů a molekul. Někteří odborníci nepřipouštějí vznik netepelných účinků. Ovšem zastánci netepelných účinků soudí, že RF pole vyvolávají ve tkáních elektrické proudy, která bez ohledu na tepelné změny ovlivňují pohyb iontů (především kalcia), čímž se mění propustnost buněčných membrán. Výsledkem je změna v elektrochemickém gradientu v buňkách a postižení na kalcium závislých enzymatických systémů včetně metaloproteáz a také mitogenem aktivovaných protein kináz (MAPK). V souvislosti s těmito jevy dochází k výše uvedenému oxidačnímu stresu i poškození DNA. V závislosti na velikosti dávky RF záření se jedná o povzbuzení prorůstových mechanismů (spouštěných i v případě jiných typů buněčného poškození) či naopak k destrukci těchto mechanismů, kterou způsobí především dlouhodobá expozice RF záření. Některé osoby tvrdí, že pociťují nespecifické zdravotní potíže při expozici RF polím pocházejícím od základnových stanic a od jiných zařízení emitujících elektromagnetická pole. Jak se konstatovalo v „Fact Sheet“ (WHO, 2006) o elektromagnetické hypersenzitivitě, nepotvrdilo se, že příčinou těchto potíží je elektromagnetické pole. Nicméně je třeba uznat závažnost zdravotních stavů lidí trpících těmito potížemi.

Dalším příkladem *netepelného* působení elektromagnetického pole na biologický objekt je stimulace nervové soustavy indukovaným elektrickým proudem (stejně jako změna struktury molekuly nebo vyvolání fotochemické reakce při absorpci kvanta záření s dostatečně velkou energií). Nejexponovanějšími částmi těla v souvislosti s mobilními telefony jsou hlava a mozek, se kterými jsou tyto přístroje v přímém

kontaktu. Bez přísunu kyslíku do mozku člověk ztrácí okamžitě vědomí, po delší době než 5-6 minutách dochází k mozkové smrti a zániku jedince. Podle poměru publikovaných prací svědčících o významném účinku nízkofrekvenčních polí není o vyvolání oxidačního stresu tímto zářením pochyb. Efekt vysokofrekvenčních polí je podobného rázu a může vyvolat u lidí neurologické potíže (bolesti hlavy, poruchy spánku). v experimentálních pracích byly prokázány souvislosti elektromag. polí se vznikem nádorů a s neurodegeneracemi.

Zvýšený přívod tepla do tkáně těla zůstává jediným zdrojem zdravotního rizika při expozici člověka elektromagnetickému záření přibližně do frekvence 10 MHz (tedy do vlnové délky 30 metrů). Hloubka pronikání elektromagnetického záření do těla exponované osoby se s klesající frekvencí (rostoucí vlnovou délkou) zvětšuje, takže značná část energie elektromagnetické vlny dlouhé 30 metrů (s frekvencí 10 MHz) tělem člověka projde, aniž by se v těle změnila v teplo.

U elektromagnetického záření a elektrických a magnetických polí s frekvencí nižší než 10 MHz se již začíná uplatňovat *rizikový faktor* – elektrický proud, indukovaný vnějším elektromagnetickým polem v tkáni těla exponované osoby. Daleko nejcitlivější na elektrický proud jsou buňky nervové soustavy. Stimulace buněk nervové soustavy elektrickým proudem může porušit srdeční rytmus a při velkých proudech i zcela paralyzovat činnost nervové soustavy. Při frekvenci 10 MHz je vliv indukovaného proudu v těle na nervovou soustavu ještě velmi slabý, s klesající frekvencí však rychle roste a při frekvenci nižší než 100 kHz převládne jeho stimulační účinek zcela nad účinkem tepelným. v intervalu frekvencí od 100 kHz do 10 MHz se může ohřívání tkáně a indukovaný proud projevovat srovnatelnou měrou a k posouzení zdravotního rizika je třeba uvažovat oba jevy současně.

Na následující je zobrazena souhrnná tabulka mechanismů, které mohou být při expozici člověka neionizujícím elektromagnetickým zářením a elektrickým a magnetickým polím zdroji rizika pro zdraví (tabulka 2).

Tabulka 2: Zdravotní rizika při expozici člověka neionizujícím elektromagnetickému záření a elektrickým a magnetickým polím dle [2]

| Mechanismus působení | Druh záření nebo pole | Riziko poškození zdraví |
|---|--|--|
| Změny struktury molekul a chemické procesy spouštěné absorpcí kvant záření (netepelné působení) | ultrafialové záření: viditelné záření: | onemocnění kůže a povrchu oka, zánět spojivek snížení citlivosti sítnice oka, porušení barvocitu |
| Zrychlení neuspořádaného pohybu molekul při absorpci záření (tepelné působení) | viditelné a infračervené záření; radiofrekvenční záření s frekvencí vyšší než 100 kHz | tepelné poškození sítnice oka, zákal oční čočky přehřátí těla nebo jeho části, popálení |
| Stimulace nervové soustavy indukovaným elektrickým proudem (netepelné působení) | elektrické a magnetické pole a elektromagnetické záření s frekvencí nižší než 10 MHz | porušení srdečního rytmu ovlivnění funkce mozku |

V celém frekvenčním intervalu od 10 MHz do 10 GHz je nejvyšší přípustný měrný výkon absorbovaný v celém těle roven 0,4 W/kg pro zaměstnance, pro ostatní osoby je ještě pětkrát nižší. Působí-li zdroj jen na část těla, což je případ mobilního telefonu, platí pro hygienické posouzení nejvyšší přípustná hodnota pro lokálně absorbovaný měrný výkon – je stanovena na 10 W/kg pro zaměstnance a na 2 W/kg pro ostatní osoby. Pro mobilní telefony se používá pro všechny osoby hodnota 2 W/kg.

Nelze vyloučit nízkofrekvenční a vysokofrekvenční elektromagnetická záření jako potenciální karcinogenní činitele. Byly vydány směrnice WHO a stanoveny bezpečnostní normy. Je prokázána nepochybná role oxidačního stresu při vzniku nádorů a souvislost dlouhodobého užívání mobilních telefonů s výskytem některých mozkových nádorů a to i ve vztahu k lateralitě. Ve studiích bylo prokázáno, že na té straně hlavy, kde byl převažující kontakt s přístrojem, vzniklo větší množství malignit. Z nervových poruch je to především stále častější výskyt autismu (zde je to zapříčiněno působením elektromagnetických polí na mozek ještě v době nitroděložního vývoje a raného dětství). Biologický účinek elektromagnetických polí je významně závislý na dávce záření, jeho frekvenci, době expozice a na individuální sensitivitě exponované osoby (věk, dědičnost). Používání přístrojů emitujících elektromagnetické záření (radiové a TV vysílače, mobilní telefony, radary, léčebné a diagnostické přístroje aj.) život lidem usnadňují, ale je nutné dbát i na zdravotní rizika s těmito přístroji spojenými. [1-4]

3 Teorie stínění elektromagnetického pole

V této kapitole je popsán vznik elektromagnetického pole a následně vysvětleno elektromagnetické záření, stínění a kompatibilita.

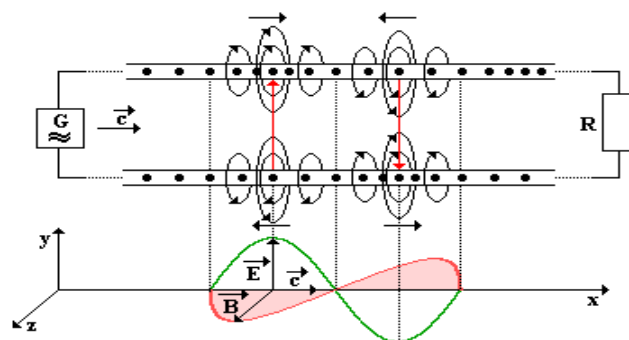
3.1 *Elektromagnetické pole*

Roku 1865 Maxwell matematicky odvodil, že existují elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí světla. Výsledky své práce shrnul do rovnic, které se staly základem teorie elektromagnetického pole.

Je-li připojeno dvouvodičové vedení ke zdroji harmonického napětí vysoké frekvence, je napětí mezi vodiči popsáno rovnicí postupné elektromagnetické vlny. To ale znamená, že ani náboj vodičů není rozložen rovnoměrně a mezi vodiči je v různých místech různá elektrická intenzita \vec{E} . Mezi vodiči tedy vzniká elektrické pole s nerovnoměrným rozložením siločar. Pro určitý okamžik je elektrické pole znázorněno na obr. 1 (symbolem \bullet jsou značeny vodivostní elektrony).

Je-li ke konci vedení připojen rezistor (spotřebič), v němž se veškerá elektromagnetická energie mění v jinou formu energie (vnitřní energie, ...), má proud ve vedení stejnou fázi jako napětí. v místech největšího napětí bude tedy ve vedení také největší proud. Současně s elektrickým polem bude tedy vznikat kolem vedení i magnetické pole, které je na obr. 1 znázorněno magnetickými indukčními čarami ve tvaru soustředných kružnic. Vektor magnetické indukce \vec{B} je kolmý na vektor \vec{E} .

Při přenosu elektromagnetické energie dvouvodičovým vedením vzniká v prostoru mezi vodiči časově proměnné silové pole, které má složku elektrickou a magnetickou a nazývá se *elektromagnetické pole*. Energie není přenášena samotnými vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi. Tento děj má charakter vlnění. Tak jsme dospěli k postupné elektromagnetické vlně, ale za předpokladu, že veškerá elektromagnetická energie se na konci vedení pohltí. Pokud tomu tak není, nastává na konci vedení odraz vlnění a odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím a vzniká vlnění stojaté. [5,6] V tabulce 3 jsou rozděleny elektromagnetické vlny z hlediska jejich vlnových délek.



Obrázek 1: Elektromagnetická vlna [6]

Elektromagnetické pole (EMP) je přesně definováno fyzikálními veličinami:

- intenzita elektrického pole E (V/m),
- intenzita elektrického pole \vec{E} udávaná v (dB μ V/m), (např. v protokolech, které vystavuje ČTÚ),
- hustota zářivého toku s (W/m²), (např. v protokolech, které vystavuje hygiena),
- intenzita magnetického pole H (A/m),
- magnetická indukce \vec{B} (T) nebo (μ T),
- vlnová délka λ (m) nebo kmitočet f (Hz),
- měrná absorbovaná energie SAR (W/kg) ve vztahu k mobilním telefonům.

Tabulka 3: Spektrum elektromagnetických vln, rozdělení podle vlnových délek dle [1]

| vlnová délka | druh záření | |
|---------------------------------------|---|--|
| 1 - 15 km | dlouhé vlny DV | radiové vlny podrobný rozpis využití radiových vln je uveden v Národní kmitočtové tabulce od ČTÚ |
| 200 – 700 m | střední vlny SV | |
| 2 - 100 m | krátké vlny VKV | |
| 0,1 – 2 m | decimetrové UKV (mikrovlny) | |
| 1 – 100 mm | centimetrové, milimetrové (mikrovlny) | |
| 10 – 1000 μm | infračervené (tepelné záření) IR | optické záření |
| 750 – 10 000 nm | infračervené IR | |
| 350 – 750 nm | viditelné VIS | |
| 100 – 350 nm | ultrafialové UV | |
| 1 – 100 nm | měkké | záření X (Roentgenovo) |
| 0,01 – 1 nm | tvrdé | |
| | měkké | záření gama |
| 10^{-4} – 0,01 nm | tvrdé | |
| 10^{-14} m | penetrační (elektromagnetická složka kosmického záření) | |

3.2 *Elektromagnetické záření, stínění, kompatibilita*

Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Schopnost zařízení nebo systémů pracovat v jejich předpokládaném provozním prostředí na navržené úrovni účinnosti, aniž by došlo k degradaci nebo příjmu neúmyslného elektromagnetického rušení.

Elektromagnetická kompatibilita je výsledkem plánovacího procesu inženýrství aplikovaného v průběhu životního cyklu zařízení. Tento proces zahrnuje úvahy o přidělování frekvencí, o konstrukci, nákupu, výrobě, výběru místa, instalaci, provozu a údržby.

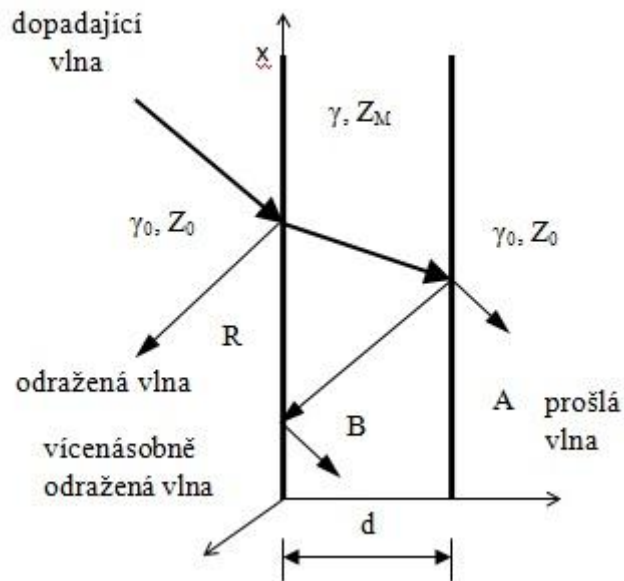
Elektromagnetické rušení (EMI). Jakékoliv vedení, vyzařování, nebo indukované napětí, které zhoršuje, znemožňuje nebo opakovaně přerušuje požadovaný výkon elektronických zařízení.

Elektromagnetický puls (EMP). Velký impulzivní typ elektromagnetických vln generovaných jadernými nebo chemickými výbuchy.

Elektromagnetické stínění je konstrukčním prostředkem k zeslabení elektromagnetického pole ve vymezené části prostoru. Při dopadu elektromagnetické vlny na stínící kryt vznikají celkem tři energie, které jsou znázorněné na obrázku 2. Vzniká:

- *R* (Reflection) = dopadající energie, která se odráží od povrchu stínícího krytu, protože impedanční diskontinuita je na rozhraní vzduch-kov. Tento mechanismus nevyžaduje zvláštní tloušťku materiálu, ale prostě jen impedanční diskontinuitu,
- *A* (Absorption) = energie, která proniká stínícím krytem (neodráží se) a je utlumena (absorbována převedením na tepelnou energii) průchodem stínícího štítu,
- *B* (Internal Reflection) = energie, která narazí na opačnou plochu štítu s další hranicí na bázi vzduch-kov, a proto se některé z nich odráží zpět do štítu. Tato energie je významná pouze tehdy, pokud absorbovaná energie ≤ 15 dB.

Na obrázku 2 jsou znázorněné výše zmíněné energie dopadající na stínící kryt.



Obrázek 2: Energie vznikající při dopadu na stínící kryt dle [7]

Stínění SE je pak dáno součtem všech tří energií, jak je znázorněno ve vztahu níže:

$$SE = R + A + B \quad (1)$$

$$SE = 20 \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right| = 20 \log \left| \frac{H_i}{H_t} \right| [\text{dB}] \quad (2)$$

kde E_i a H_i jsou intenzity elektrického a magnetického pole dopadající na stínící překážku, E_t a H_t jsou intenzity polí po stínění.

Teorie stínění je založena na Maxwellových rovnicích. Stínění je definována jako poměr intenzity elektromagnetického pole měřeného před a po instalaci stínícího materiálu. Předpokládá se, že stínění je nekonečná rovina, a že je umístěno mezi zdrojem elektromagnetického záření a měřicího zařízení. Oblast kolem zdroje elektromagnetického záření, může být rozdělena právě do tří oblastí:

- Oblast pole, kde lze pozorovat rovinnou vlnu, kde jsou vlastnosti oblasti závislé na prostředí, ve kterém se vlna šíří.
- Oblast pole, kde vlastnosti oblasti závisí především na parametrech zdroje rušení a na okolí.
- Přechodná oblast na pomezí obou výše uvedených oblastech.

Teoretická hranice mezi vzdáleným polem a blízkou oblastí je rovna $r = \lambda / 2\pi = 1$ (zhruba λ/π vlnové délky - λ). v praxi vzdálenost vzdáleného pole lze předpokládat jako $r > 5\lambda / 2\pi$. Rozlišovacím parametrem popisujícím elektromagnetické pole je poměr elektrického pole E na složky magnetického pole H složky, známé jako vlnová impedance $Z = E/H$. Pro vzdálené pole s projevem rušení v otevřeném prostoru nebo ve vzduchu je vlna impedance $Z = E/H = Z_0 = 377 \text{ W}$. v blízké oblasti tato impedance závisí na vlastnostech zdroje elektromagnetického pole, vzdálenost od zdroje do místa měření a parametry šíření prostředí.

Kovy mají srovnatelnou povrchovou impedanci s hodnotou úrovně magnetických vln v poli. Tudíž v ochraně proti magnetickým polím musí být účinnost stínění získána z velké části prostřednictvím útlumu A . Na druhé straně mají kovy mnohem nižší povrchovou impedanci, než je povrchová impedance elektrického pole s vysokou impedancí, a tak jsou kovy proti těmto polím dobře chráněny. Protože existuje velké množství povrchových odrazů R , tak není požadována velká tloušťka štítu pro větší absorpci A .

Ve velkých zařízeních je poměrně snadné získat 40 dB stínící účinnosti při frekvenci v rozmezí nad 100 kHz s jedním štítem, úrovně vyšší než 100 dB se dosáhne pečlivou pozorností k instalaci tohoto systému. Pro stínící úrovně účinnosti až 120 dB jsou zpravidla nutné svařované plochy nebo dvojité izolované štíty. [7-9]

3.3 Způsoby hodnocení stínění SE

V praxi se většinou používají dva typy měření efektivity elektromagnetické stínící účinnosti, a to přenosové koaxiální vedení například pomocí přístroje Standard ASTM D4935, které se používá pro měření frekvencí nižších než 1,5 GHz a dále metoda stíněného prostoru pomocí například přístroje MIL-STD-285, která měří stínící účinnost SE při frekvencích vyšších, až do hodnoty 100 GHz.

3.3.1 STANDARD ASTM D4935

Tato zkušební metoda je založena na podélném rozdělení koaxiálním držáku, do kterého se vkládají vzorky testovaného materiálu. Při měření se zkoumá, jak vložený materiál ovlivní kapacitní vazbu mezi vodiči v držáku. Výstupem zkoušky je hodnota elektromagnetické stínící efektivity (SE) způsobená odrazem a absorpcí. Samostatné měření odražené a absorbované energie může být dosaženo přidáním kalibrované

obousměrné spojky ke vstupu držáku. Na obrázku 3 se nachází přístroj ASTM D4935 a na obrázku 4 je znázorněno pak schéma válců tohoto koaxiálního vedení.

Z naměřených dat čisté hodnoty SE lze vypočítat hodnoty pro magnetické (H) pole elektrických tenkých vzorků, hodnoty elektrického pole (E), ale jejich platnost a použitelnost nebyla stanovena.

Metoda měření se nachází v kmitočtovém rozsahu 30 MHz až 1,5 GHz. Tyto limity nejsou přesné, ale jsou založeny na snížení objemového proudu. Pro elektricky tenké, izotropní materiály s frekvenčně nezávislými elektrickými vlastnostmi jako vodivost, permitivita a permeabilita, může být měření uskutečněno v pouhých několika frekvencích, když budou hodnoty SE nezávislé na frekvenci. V případě, že materiál není elektricky tenký nebo pokud se některý z parametrů mění s frekvencí, měření by mělo být provedeno na mnoha frekvenčních pásmech. [10]

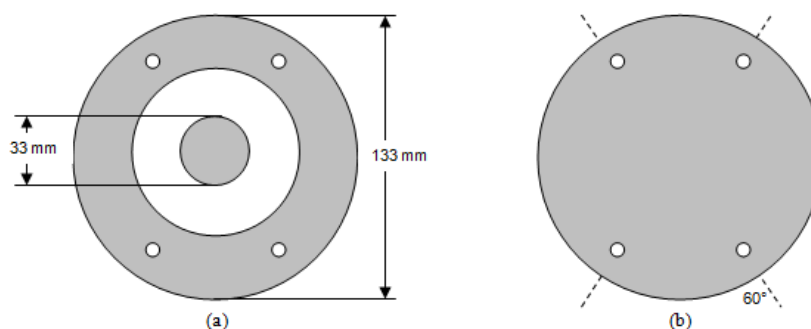


Obrázek 3: Standard ASTM D4935 dle [11]

Jedná se o koaxiální přenosové vedení. Efektivita elektromagnetického stínění je určena v decibelech dle následujícího vzorce:

$$SE = 10 \log P_1 / P_2 \quad (3)$$

kde P_1 je přijatý výkon vedení s plným vzorkem a P_2 je přijatý výkon vedení s referenčním vzorkem. [12]



Obrázek 4: Schéma válců koaxiálního přenosového vedení dle [12] – šířkové jednotky v mm

3.3.2 MIL-STD-285

Metoda pro hodnocení účinnosti stínění byla vyvinuta v USA pro vojenské účely, a byla vydána v roce 1956. Je to asi nejčastěji norma měření útlumu stínících systémů ve frekvenčním rozsahu 100 kHz do 10 GHz. Tato norma definuje frekvence a elektromagnetické součástky oblasti, která je předmětem testování a uvádí potřebné zařízení a konfiguraci antény. Zdroj signálu je umístěn uvnitř testovaného prostoru, zatímco měřicí zařízení je umístěno mimo.

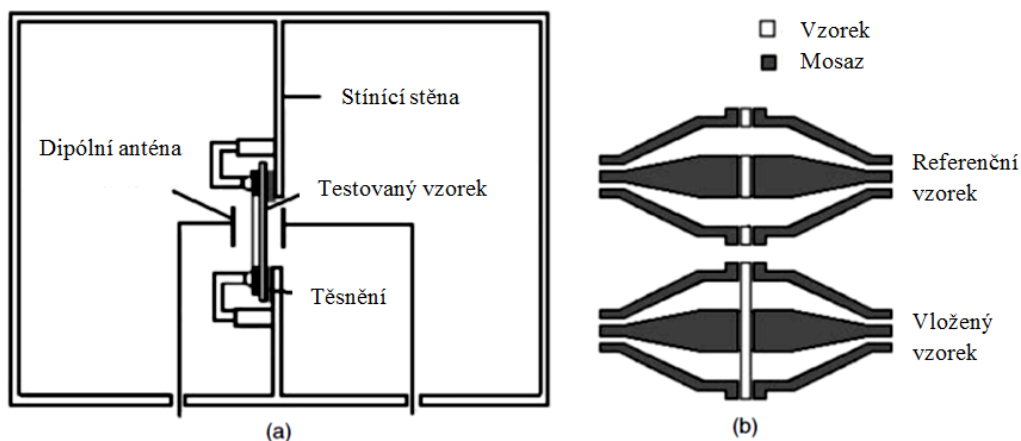
V metodě je často odkazováno na "modifikovaný MIL-STD-285", kde je stínící účinnost materiálu hodnocena v otevřeném správně stíněném prostoru. Metody pro měření stínící účinnosti popsané v MIL-STD-285 byly později nahrazeny těmi v IEEE-STD-299. Norma popisuje metody pro měření stínící účinnosti pro elektrické systémy s nejmenším lineárním rozměrem tohoto prostoru 2 m. Rozsah měření v této metodě je rozdělen do 3 dílčích rozsahů:

- nízký rozsah - od 9 kHz (50 Hz) do 20 MHz - pro magnetickou složku (H),
- rezonanční sortiment - od 20 MHz do 300 MHz - pro elektrické komponenty (E),
- vysoký rozsah - od 300 MHz až 18 GHz (100 GHz) - pro rovinné vlny (P).

Poslední revize IEEE-STD-299-2005 nezavádí žádné významné změny v metodice měření, namísto se přidávají sekce zabývající se nejistotami měření. [8, 13]

Na obrázku 5 je schematicky zobrazena Standardní metoda MIL-STD 285 je založena na elektromagnetických vazbách mezi párem antén, které jsou odděleny rovinnou deskou. Stanovení referenční úrovně mezi zdrojem a přijímačem se měří bez vloženého materiálu, následně je měřena úroveň pomocí zkušebnímu materiálu

vloženého v okně stínící stěny viz obrázek 5 (a). Ztráta způsobená vložením vzorku lze určit pomocí metody ASTM D4935. Tato technika využívá koaxiálního vedení s příslušným konektorem, viz 5 (b).



Obrázek 5: Standardní metoda MIL-STD 285

3.3.3 Klasifikace stínících textilií

Dle dokumentu Specifické požadavky elektromagneticky stínících textilií [14] lze tyto textilie dělit do dvou tříd:

- Třída I – profesionální použití: zdravotnické vybavení, materiály do karantény, bezpečnostní obleky pro výrobce elektroniky, elektronické nářadí nebo další nové aplikace,
- Třída II – obecné použití: běžné oděvy, oděvy do kanceláře, těhotenské oděvy, ochranné zástěry, výrobky související s přenosem dat, elektronické výrobky a další nové aplikace.

V tabulce 4,5 je zobrazena klasifikace stínících textilií dle jejich elektromagnetické stínící účinnosti.

Tabulka 4: Třída I - Profesionální použití

| Stupeň | 5 Výborný | 4 Velmi dobrý | 3 Dobrý | 2 Průměrný | 1 Slabý |
|--|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Procentuální hodnota elmag.stínění | $ES > 99,9999\%$ | $99,9999\% \geq ES > 99,999\%$ | $99,999\% \geq ES > 99,99\%$ | $99,99\% \geq ES > 99,9\%$ | $99,9\% \geq ES > 99,0\%$ |
| Rozsah efektivity elmag.stínění | $SE > 60\text{dB}$ | $60\text{dB} \geq SE > 50\text{dB}$ | $50\text{dB} \geq SE > 40\text{dB}$ | $40\text{dB} \geq SE > 30\text{dB}$ | $30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$ |

Tabulka 5: Třída II - Obecné použití

| Stupeň | 5 Výborný | 4 Velmi dobrý | 3 Dobrý | 2 Průměrný | 1 Slabý |
|--|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Procentuální hodnota elmag.stínění | $ES > 99,9\%$ | $99,9\% \geq ES > 99,0\%$ | $99,0\% \geq ES > 90\%$ | $90\% \geq ES > 80\%$ | $80\% \geq ES > 70\%$ |
| Rozsah efektivity elmag.stínění | $SE > 30\text{dB}$ | $30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$ | $20\text{dB} \geq SE > 10\text{dB}$ | $10\text{dB} \geq SE > 7\text{dB}$ | $7\text{dB} \geq SE > 5\text{dB}$ |

4 Elektrické vlastnosti materiálů

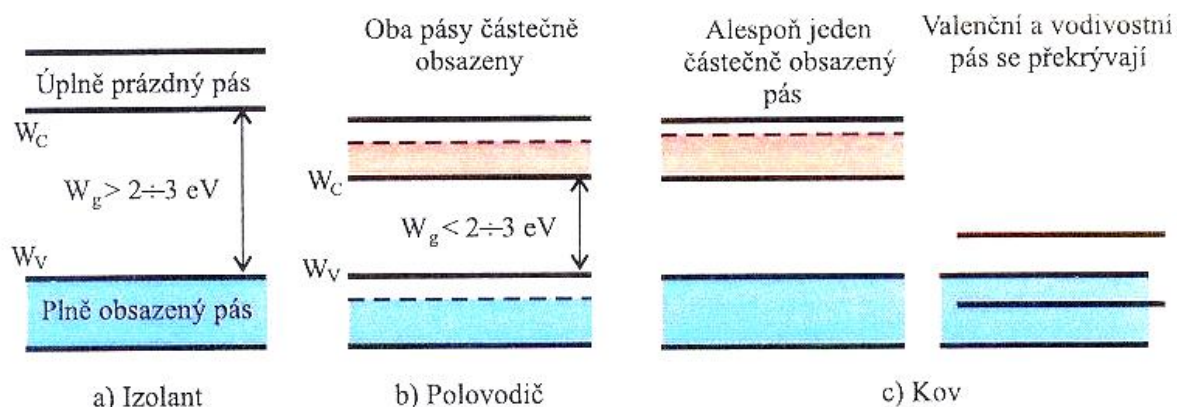
Z hlediska elektrických vlastností dělíme látky na tři skupiny - na vodiče, polovodiče a izolanty. Elektrony v atomech přednostně obsazují nejnižší energetické stavy, a proto jsou dolní energetické pásy zcela zaplněny. Pro hodnotu elektrické vodivosti pevných látek je pak rozhodující, zda elektrony úplně, nebo jen částečně zaplňují nejvyšší energetické pásy, tj. valenční a vodivostní pás. Mezi nimi se v řadě případů nachází již zmíněný zakázaný pás energií, jehož šířka W_g má zásadní význam pro hodnotu elektrické vodivosti polovodičů a izolantů. Na obrázku 6 jsou znázorněny pásové rozdíly mezi izolantem, polovodičem a vodičem.

V případě kovové vazby tvoří atomy mřížku kladně nabitých iontů a valenční elektrony jsou k atomům vázány jen volně a tvoří tzv. elektronový plyn. To si lze představit tak, že těsné uspořádání atomů vede k promíchání elektronů od sousedních

atomů. Valenční elektrony nepřísluší konkrétnímu atomu či dvojici atomů a mohou přecházet od jednoho jádra k libovolnému dalšímu. v přiloženém elektrickém poli pak mohou vést elektrický proud. Vysoká koncentrace volných elektronů je předpokladem vysoké elektrické vodivosti tak, jak je u kovů obvyklé.

Budou-li všechny hladiny ve valenčním pásu plně obsazeny a zakázaný pás příliš široký (větší než 2 až 3 eV), zůstane vodivostní pás až do vysokých teplot zcela neobsazen. Vodivost látky bude zanedbatelná, zatímco měrný odpor bude obrovský ($\rho = 1/\sigma \approx 10^{14}$ až $10^{20} \Omega\text{cm}$). Taková látka se bude chovat jako *izolant*. Jiná situace nastane, bude-li šířka zakázaného pásu menší natolik, aby mohly elektrony dodáním tepelné energie ($T \gg 0 \text{ K}$) překonat zakázaný pás. Pak dostaneme látku vykazující za nízkých teplot zanedbatelnou vodivost, avšak za vyšších teplot, např. Při pokojové teplotě, o mnoho řádů větší vodivost. Tato látka je pak *polovodičem* ($\rho = 1/\sigma \approx 10^{-2}$ až $10^9 \Omega\text{cm}$). Částečně obsazený vodivostní pás bude obsahovat volné elektrony dodané z pásu valenčního. Po elektronech ve valenčním pásu zbudou volné energetické hladiny, tzv. díry. Jelikož jsou volné, mohou vedle elektronů ve vodivostním pásu přispívat k elektrické vodivosti.

U *kovů* se buď valenční a vodivostní pásy překrývají, nebo není jeden z nich úplně obsazen. Obecně lze tedy říci, že vodivostní pás kovů není zcela obsazen. Odtud vyplývá pro většinu případů velmi nízká hodnota měrného odporu ($\rho = 1/\sigma \approx 10^{-2}$ až $10^9 \Omega\text{cm}$). [15]



Obrázek 6: Rozdíl mezi izolanty, polovodiči a vodiči z hlediska uspořádání pásů [15]

4.1 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost kvantifikuje schopnost transportu nosičů elektrického náboje danou látkou po přiložení vnějšího elektrického pole E . Elektron se ale může krystalem volně

pohybovat ve směru pole pouze tehdy, bude-li mu dodána potřebná energie, tj. může-li přejít na vyšší energetickou hladinu. Je-li ale energetický pás elektrony plně obsazen, není v něm pro tento účel vyšší energetická hladina volná. Vedení proudu je potom možné jen tehdy, je-li elektronu dodána energie dostatečná pro přechod do pásu vyššího. Přechodem z valenčního do vodivostního pásu přes zakázaný pás ve vertikálním směru vzniknou volné nosiče náboje a látka se stane vodivou. Nejčastější formou energie pro tento účel je tepelná energie kmitů mřížky, může se ale také jednat např. o energii elektromagnetického vlnění (fotony světla nebo infračerveného záření), rychlých elektronů nebo iontů. [15]

Elektrická vodivost (*konduktance* = reálná vodivost elektrického obvodu). Elektrická vodivost udává velikost elektrického proudu procházejícího vodičem při jednotkovém napětí na jeho koncích. Jednotkou elektrické vodivosti G je 1 S (siemens $\rightarrow \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2 = \Omega^{-1}$).

Konduktance je určena vztahem:

$$G = \frac{I}{U}, \quad (4)$$

kde i (A) je elektrický proud protékající vodičem a u (V) je elektrické napětí na koncích vodiče. Nebo je také dána vztahem:

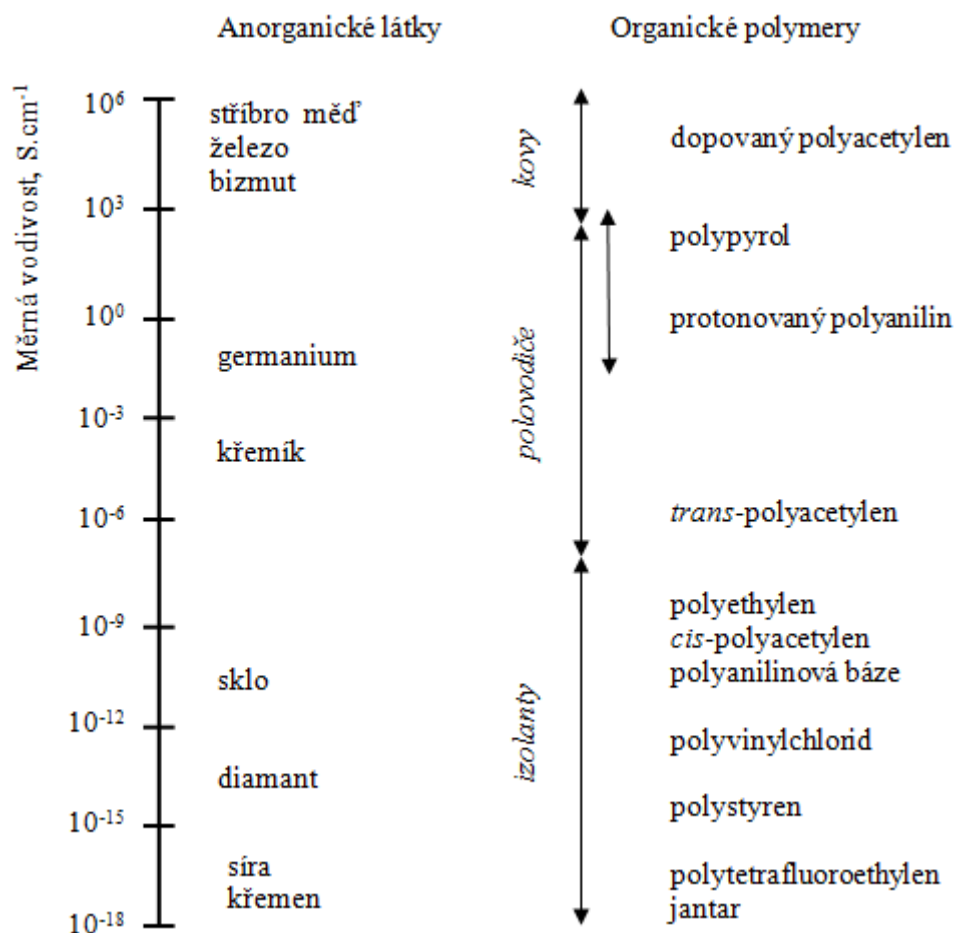
$$G = \sigma \frac{S}{l}, \quad (5)$$

kde σ (S/m) je konduktivita látky, S (m^2) je obsah průřezu vodiče a l (m) je délka vodiče.

Elektrická vodivost je převrácená hodnota elektrického odporu R , tzn.

$$G = \frac{1}{R} \quad (6).$$

Konduktivita σ (*měrná elektrická vodivost*) závisí na teplotě, zejména u polovodičů je tato závislost velmi významná. Jednotkou měrné elektrické vodivosti je 1 S/m ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1} = \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$). Na obrázku 7 se nachází měrná elektrická vodivost některých látek dle [16].



Obrázek 7: Měrná elektrická vodivost vybraných látek dle [16]

4.2 Elektrický odpor

Pro přibližné měření odporu se používá nejčastěji Ohmova metoda. To znamená měření proudu protékajícího odporem a napětí na odporu a z toho podle Ohmova zákona vypočítáme odpor. Pro přesné měření odporu a pro případy, kdy je obtížné použít Ohmovu metodu (např. při měření velmi malých či velmi vysokých odporů) se používají můstkové metody.

Ohmův zákon funguje na principu nabitého kondenzátoru s nábojem Q současně s elektrodami, mezi kterými je napětí U . Vodivé spojení obou elektrod zaručí vyrovnání nábojů a vodičem pak protéká proud I . Jednotkou elektrického proudu je jeden Ampér (A). Je to právě takový proud, který by protékal vodičem, kdyby se náboj kondenzátoru o velikosti jednoho C (coulomb) vyrovnával po dobu jedné sekundy. Náboj je tedy součinem proudu a času, po který tento proud protéká. $1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ As}$

(ampérsekunda). Žádný materiál za normálních podmínek (při běžné teplotě okolí) nevede elektrický proud ideálně, ale klade mu jistý odpor. K překonání tohoto odporu musí být na obou koncích odporu potenciálový rozdíl – napětí.

$$I = R/U \quad (7)$$

Odpor vodiče je měřen v jednotkách ohm (Ω). Odpor 1Ω má vodič, kterým při napětí 1V prochází proud právě 1A.

Vodiče elektrického proudu se používají převážně ve tvaru taženého drátu (v našem případě vlákna či příze). Odpor vodiče závisí na materiálu vodiče (měrný odpor ρ), délce vodiče l a na průřezu vodiče S . Pro odpor R platí [17]:

$$R = \rho l/S \quad (8)$$

4.3 Elektrické vlastnosti plošných textilních útvarů

Měření se provádí na základě normy ČSN 34 1382 ($t=20\pm 2^\circ\text{C}$, relativní vlhkost vzduchu=40%). Přístroj měří 2 veličiny – povrchový a objemový odpor v Ω (ohm), které jsou následně přepočítané na povrchovou a objemovou rezistivitu dle vzorců (9, 10).

Výpočet povrchové rezistivity

$$R_S = r_S \frac{o}{l}, \quad (9)$$

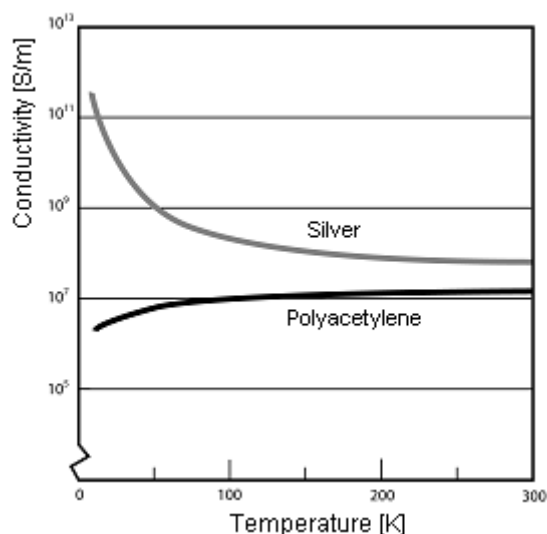
kde R_S je povrchová rezistivita (Ω), r_S je povrchový odpor (Ω), o je střední obvod (resp. délka elektrod (m), l je vzdálenost elektrod (m).

Výpočet objemové rezistivity

$$R_V = r_V \frac{S}{h}, \quad (10)$$

kde R_V je objemová rezistivita (Ωcm), r_V je objemový odpor (Ω), h je tloušťka textilie (cm), S je plocha elektrod (cm^2). [18]

Závislost elektrické vodivosti na teplotě je u polymerů rozdílná než u kovů nebo polovodičů. Stoupá zpravidla s klesající teplotou pro kovové materiály, zatímco vodivost obecně klesá se snižující se teplotou pro polovodiče a izolátory, viz obrázek 8.



Obrázek 8: Závislost vodivosti na teplotě pro stříbro (kov) a polyacetylen (vodivý polymer) dle [19]

5 Možnosti tvorby stínících textilií

Jako nejlepší stínící materiál jsou považovány kovy, které mají vysokou elektrickou vodivost a vysokou odrazivost elektromagnetického záření. Je ale obtížné kovy aplikovat do textilních systémů, pro jejich nepoddajnost, velkou hmotnost a složitost zakomponování do textilií.

Metody vytváření vodivých vláken jsou:

- 1) plnění polymerních vláken částicemi uhlíku nebo kovu;
- 2) povrchová úprava vláken nebo plošných textilií vodivými polymery nebo kovem;
- 3) použití kontinuálních nebo krátkých vláken, které jsou zcela vyrobeny z vodivého materiálu. [20]

Elektrická vodivost kompozitu je obecně závislá na objemovém podílu plniva. Při nízkém objemovém podílu plniva je vodivost kompozitu stále velmi blízká vodivosti čisté polymerní matrice. v určitém kritickém zatížení, tzv. perkolačním prahu se vodivost zvýší o několik řádů i s velmi malým zvýšením množství plnidla. Při dosažení perkolačního prahu se začne tvořit souvislá vodivá síť přes povrch kompozitu. [21]

Komercializovaná vodivá spředená vlákna se připravují disperzí z vodivých částic jako je stříbro, nikl, nerezavějící oceli, hliník, grafit a saze do společné polymerní matrice. S cílem získat vysoce vodivé směsi musí je nezbytná vysoká koncentrace nábojů a homogenní směsování morfologie. Nicméně vysoká koncentrace

nábojů v matici polymeru naznačuje křehkost směsí a vysoké náklady na výrobu. Úprava vlákna (příze) s použitím neodmyslitelného vodivého polymeru je zajímavým přístupem. Vodivé polymery vykazují elektrické vlastnosti díky jejich konjugované dvojné vazbě v řetězci struktury, které pocházejí z jejich vodivé nebo neutrální (nevodivé) formy. Nicméně tyto polymery jsou ze své podstaty nerozpustné nebo spárené v důsledku jejich silné mezimolekulové interakce. Výroba vysoce kvalitních vodivých směsí s běžnými polymery hnětením taveniny nebo z roztoku je stále ve výzkumu. [22]

Studie [23] aplikovala pokovením na textilní materiály stínící složky Ag, Ni, Cu, Sn, Pu a zároveň zkoumala netkanou textilií z uhlíkových vláken. Nikl a cín je obvykle nánosován až po nánosu mědi, která zabraňuje korozi a pomáhá zajistit mechanickou ochranu, stříbro je obvykle prvním pokovením a tento nános je až následně pokoven jiným prvkem pro dosažení lepších vlastností. Tkaniny s více než jedním kovovým povlakem mají obvykle vyšší SE a pokovení je vyšší než SE povlaků z polypyrolu (PPY) nebo uhlíkových vláken. Nicméně stříbro, nikl, měď, cín a plutonium má vysokou pořizovací cenu a jejich získání je obtížné, proto jako adekvátní stínící materiál může být použita netkaná textilie z běžně používaných uhlíkových vláken. Tato netkaná textilie byla v již zmíněné studii zkoumána pro svou stínící účinnost. Bylo zjištěno, že obecně netkané textilie vykazují vyšší stínící účinnost než pletené struktury pro svůj větší prostor mezi vlákny a vykazují nižší účinnost stínění než struktury tkané. Uhlíková vlákna vykazují velkou absorbanci elektromagnetického záření, stejně jako polypyrolový nános, ovšem u tkanin povlakovaných uhlíkem nebylo možné provést prací cyklus, kvůli velké lehkosti a vysoké křehkosti. Proto byly hledány nové způsoby stínících bariér pro ochranu zdraví člověka, k tomu slouží vodivé polymery, které jsou svými vlastnostmi podobné materiálům kovovým, avšak si zachovávají výhody textilních dobře zpracovatelných vláken.

5.1 Vodivé polymery a jejich dopování

Polymery jsou všeobecně známy jako izolanty (nevedou elektrický proud). Mají dobré mechanické vlastnosti a snadno se zpracovávají. Jejich předností je také nízká hustota, a proto se stále více využívají v oborech, kde je žádoucí malá hmotnost materiálu.

Vodivé polymery jsou tvořeny systémem konjugovaných vazeb (pravidelné střídání jednoduchých a dvojných vazeb v molekulární struktuře). Vodivé polymery vykazují, na rozdíl od polymerů ostatních, vlastní elektrickou vodivost. Kromě konjugace je dalším nezbytným předpokladem elektrické vodivosti přítomnost nositelů náboje, které zprostředkovávají jeho transport po řetězci. Ty vznikají procesem, který je v analogii s klasickými polovodiči nazýván dopováním. Je však podstatný rozdíl mezi dopováním anorganických a organických polovodičů. U anorganických polovodičů výrazně ovlivňují elektrické vlastnosti již stopové koncentrace dopující látky, u polymerů je potřeba koncentrací řádově vyšších, jednotek až desítek procent. Na rozdíl od běžných polovodičů mohou vodivé polymery měnit svou strukturu, a tedy i své vlastnosti v reakci na okolní prostředí.

Příklady vodivých materiálů jsou polyacetylen, polypyrol, polythiofen, polyanilin, polyfenylen či poly-(p-vinylfenylen). Strukturně nejjednodušším konjugovaným polymerem je polyacetylen. Ten má dvě konformace, *trans* a *cis* formu. Syntézou se získávala jejich směs. Z hlediska elektrické vodivosti je zajímavá pouze *trans* forma, kterou v čisté formě stříbritého polymerního filmu získal až Hideki Širakawa. i přes vysokou vodivost polyacetylenu blíží se vodivosti kovu (až $5 \times 10^5 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$), jeho nízká stabilita na vzduchu vedla k určitému posunu pozornosti ve prospěch mnohem stabilnějších polymerů - polyanilinu a polypyrolu. Anilinová čern je známá už od 19. století. Polyanilin je pravděpodobně nejstarším organickým polymerem, který člověk vytvořil. Tento zelený produkt, získaný oxidací anilinu, popsal ji. r. 1840 J. Fritsche, který se krátce po získání anilinu (jako rozkladného produktu indiga) snažil vytvořit nová syntetická barviva. V roce 1862 britský profesor chemie H. Lethby popsal elektrochemickou oxidaci anilinu, který po pojednání alkálií změnil barvu na modro. Polyanilin existuje v řadě forem, které se liší stupněm oxidace či protonace. Když se odebírají nebo dodávají elektrony chemickou či elektrochemickou oxidací a redukcí, lze získat formy s různou chemickou strukturou, stabilitou, zbarvením a elektrickými vlastnostmi. Asi nejzajímavější reakcí je *protonace polyanilinu*. Jestliže je dárce protonu vhodná anorganická či organická kyselina, vzroste vodivost polyanilinu v rozmezí osmi až deseti řádů. Vyšších vodivostí lze (stejně jako u polyacetylenu) dosáhnout mechanickým namáháním polyanilinových filmu či vláken. Příprava polyanilinu je jednoduchá. Vychází z běžných chemikálií.

Probíhá ve vodném prostředí, na vzduchu, při laboratorní teplotě trvá několik desítek minut a výtěžek je téměř stoprocentní. [16, 24]

Polythiofen (PTH) a jeho deriváty vzbudily značnou pozornost v průběhu posledních několika let. Byly studovány z hlediska jejich různých důležitých aplikací - ochrana proti korozi, solární články, senzory, nosiče katalyzátorů, superkondenzátory a modifikované elektrody z důvodu jejich vysoké vodivosti, vynikající stability v okolním prostředí a jedinečných fotovoltaiických a elektronických vlastností. Bohužel špatná zpracovatelnost nesubstituovaného PTH, který je nerozpustný a netavitelný špatně omezuje jeho další rozsáhlé aplikace. Jednou z účinných metod pro zlepšení zpracovatelnosti, je příprava PTH nanomateriálů, které mohou být dobře dispergovány v různých matricových materiálech. Ovšem rozpustnost monomeru thiofenu ve vodném prostředí je velmi malá. Kromě toho nebyla studována ani chemická oxidační polymerace z thiofenu v nevodném reakčním médiu obsahující povrchově aktivní látky pro syntézu nanočástic PTH. [25]

Polyfenylu je věnována menší pozornost z důvodu těžkých experimentálních podmínek při elektrické polymeraci benzenu. Kvůli nízkému oxidačnímu potenciálu bifenyly se k polymeraci používají pouze aprotická rozpouštědla. [26]

Dopování

Proces dopování zavádí nosiče náboje (polarony a bipolarony) do polymeru a činí to strukturu vodivou [25] a [27]. Stejně jako v polovodičové technologii, se doping může uskutečnit dvěma způsoby: *p-doping*, kde polymer oxiduje a bude mít kladný náboj, a *n-doping*, kde je polymer snižován a má záporný náboj [25].

Dopovací proces probíhá v průběhu syntézy a může být proveden chemicky, elektrochemicky nebo prostřednictvím fotodopingu [27]. Ve většině případů je jako přísada použita biologická molekula, dopována elektrochemickou metodou. Biologická molekula je nabitá a umístí se do monomeru, kde dojde k elektrochemické syntéze [27].

Příměsi mohou být rozděleny do dvou kategorií na základě jejich molekulové velikosti: malé příměsi (například chloridový anion) a velké příměsi (například polystyrensulfonátu sodného, PSS). Oba ovlivní vodivost a strukturální vlastnosti polymeru, ale velké příměsi budou mít vliv na vlastnosti materiálu výrazně více a mohou zvýšit hustotu. Velké příměsi jsou více integrovány do

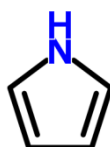
polymeru a nevyplaví se. S použitím elektrického podnětu mohou poskytnout polymeru větší elektrochemickou stabilitu. [28]

5.2 Polypyrol

Je to sloučenina několika monomerů pyrolu. Polypyrol vykazuje houbovitou strukturu, počáteční teplota rozkladu nastává při 180 - 237 °C, teplota skelného přechodu je v rozsahu 160 až 170 °C, a elektrická vodivost pod 3 S/cm. Všechny výsledky ale závisí na poměru oxidačního činidla (např. FeCl₃) a pyrolu.

5.2.1 Definice chemické látky

Pyrol C₄H₅N



Obrázek 9: pyrol dle [29]

Polypyrol (viz obrázek 9) je jeden ze třídy organických heterocyklických sloučenin pětičlenných dvakrát nenasyčených kruhových struktur složených ze čtyř atomů uhlíku a jednoho atomu dusíku. Nejjednodušší člen pyrolového uskupení je sám o sobě pyrol, základní heterocyklická sloučenina. Pyrol je bezbarvý až světle žlutý, toxický olej s pronikavou chutí a zapáchá podobně jako chloroform. Je nerozpustný ve vodě, ale rozpustný v alkoholu, etheru a zředěných kyselinách, vře při 129 až 131 °C, polymeruje na světle. Pyrolový kruhový systém se nachází v barevných produktech přírody (zelené barvivo, chlorofyl, hemoglobinu, modrá, indigo). Molekulární hmotnost je 67,09 g/mol. Teplota tání pyrolu je -23 °C. [29, 30, 31]

5.2.2 Využití polypyrolu nejen v textilním průmyslu

Pyrol a jeho deriváty jsou široce používány jako meziprodukt při syntéze léčiv, agrochemikálií, barviv, fotografických chemikálií, parfémů a jiných organických sloučenin. Jsou také používány jako katalyzátory polymerace, inhibitory koroze, konzervační prostředky a jako rozpouštědla pro pryskyřice a terpeny. Používají se v metalurgických procesech. Jsou užitečné při intenzivním studiu přechodných kovů,

komplexu katalyzátorů chemie pro rovnoměrné polymerace, luminiscenční chemie a pro spektrofotometrickou analýzu. [30]

Polypyrol má velice dobrou environmentální stabilitu, snadnou syntézu a vyšší vodivost než mnoho jiných vodivých polymerů, proto je velice vhodným kandidátem pro komerční použití. Polypyrol lze často využít jako biosenzory, senzory, dráty, antielektrostatické nátěry, masivní elektrolytické kondenzátory, balení, polymerní baterie, funkční membrány. PPY povlaky mají výbornou tepelnou stabilitu a jsou dobrým kandidátem pro použití v uhlíkových kompozitech. [31]

Dle studie [32] se textilie potažené vrstvou polypyrolu mohou využít v kompozitních strukturách, kde jsou výhodně spojeny textilní vlastnosti podkladu a elektrické vlastnosti polypyrolového nánosu. Jako kompozit lze využít textilií v kontinuálních dopravních pásích, použitých v uhelných dolech, či brusných pásích. Díky dobrým adhezním vlastnostem a ekologické stabilitě jsou nánosované textilie vhodnou aplikací v trupu letadla. Elektromagnetické odezvy pro polypyrolem potažené textilie s povrchovou vodivostí 10 a 10 000 Ω/m^2 umožňují užití textilií jako maskovací aparát a podobné vojenské aplikace. Polypyrolem potažené textilie vykazují výjimečnou výkonnost za stálého ohýbání. Další aplikace, kde vodivé textilie najdou vynikající použití je v produktech, kde je požadováno statické rozptýlení, a to například ve filtračním zařízení za použití hořlavých rozpouštědel, či pracovní oblečení v rafineriích.

6 Literární rešerše

V této kapitole byla provedena literární rešerše zkoumající již provedené studie o nanášení polypyrolové vrstvy na textilii, způsobu vytvoření polypyrolu a polymeračních příčinách, které ovlivňují výslednou elektrickou vodivost a účinnost elektromagnetického stínění textilie s naneseným polypyrolem. Z této rešerše byl stanoven závěr, který slouží jako podklad k experimentální části.

Polypyrol vzniká chemicky, elektrochemicky současně s oxidací a polymerací pyrolu. K přípravě většího množství polypyrolu je chemická polymerizace vhodnější než elektrochemická. Při chemické polymerizaci pyrolu je možné použít celou řadu oxidačních činidel - peroxodisíran amonný, peroxid vodíku a různé druhy solí obsahující kovy přechodových iontů, např. Fe^{3+} , Cu^{2+} , CrO_4^{2-} , Ce^{4+} , Ru^{3+} a MnO_4^- . v praxi je dávana přednost chloridu železitému díky vyšší měrné vodivosti připraveného polypyrolu. [16]

Chemická cesta poskytuje polypyrol především ve formě prášku nebo v nanosech, a proto je polypyrol dobře přizpůsoben pro průmyslové aplikace. Centrum pro materiálové vědy a inženýrství (CEREM) francouzské Agentury pro jadernou energii (CEA) spolu s francouzskou společností Rhénoflex Dreyer vyvinulo nový proces polypyrolového nanosu na textilii. Tento polypyrolový nános může být na všech druzích materiálů – přírodních, umělých, syntetických, minerálních, tkaných, pletených a netkaných textilií, jak je uvedeno ve studii [33]. Nános byl vytvořen dvěma vodnými roztoky – první se skládal s pyrolu a kyseliny naftalen-sulfonové (NSA – molární poměr NSA/PPY=0,3) a druhým byl chlorid železitý (FeCl_3 – molární poměr FeCl_3 /PPY=2,3). Oba dva roztoky byly uloženy v reakčních válcích pod nízkým tlakem a teplotou nižší než 10 °C po dobu 6 hodin. Při zachování popsaného postupu získala textilie povrchovou rezistivitu kolem 10 Ω . Tyto textilie byly pak použity na výrobu tepelných aplikací – vyhřívaných autosedaček, teplého oblečení pro zimní sporty a teplých rukavic pro medicínské účely.

Aplikace vodivého polymeru polypyrolu na polyesterovou textilii za účelem zvýšení její vodivosti a získání textilní struktury s určitým stupněm odolnosti vůči elektromagnetickému smogu je popsáno v článku [34]. i v tomto případě je využito chemické in-situ polymerizace za použití kyseliny antrachinon-2-sulfonové jako dopantu (molární poměr ASA/PPY=0,33:1), jako polymerizační katalyzátor byl pro

veškeré reakce použít dusičnan železitý (molární poměr $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3/\text{PPY}=2,3$ mol/mol). Výsledkem je nános rovnoměrné vodivé vrstvy s tloušťkou pod 1 mikrometr na netkané textilie. Podařilo se připravit netkané textilie se stínící účinností až 37 dB při frekvenci 800 MHz. U těchto materiálů je EMI-SE srovnatelné nebo dokonce vyšší než stínění pro polyanilinové systémy nebo kompozity s vrstvou z uhlíkových vláken. Bylo zjištěno, že čím nižší je povrchová rezistivita vzorku, tím vyšší je dosaženo stínící účinnosti. Vytvořením vodivé polyesterové textilie pomocí polypyrolu se zabývá velká škála odborných článků [35-41]. Metodou chemické polymerace – insitu metodou se zabývá práce [42].

Ve studii [23] bylo analyzováno několik textilních materiálů – tkaniny, pleteniny, netkané textilie potažené kovem – Ag, Cu, Sn, Ni, Pu a s nanesením uhlíku a polypyrolu z hlediska jejich užití v lékařském prostředí. Jako zástupce textilií s PPY nánosem byla použita pletenina „Eontex“ s plošnou měrnou hmotností 72 g/m^2 a tkanina „Eontex“ s plošnou měrnou hmotností 223 g/m^2 a tloušťkou 0,5 mm. Nejlepší stínící účinnost vykázaly textilie potažené stříbrem, které byly z důvodu jejich antimikrobility vybrány jako nejlepší textilie pro lékařské prostředí. Textilie s naneseným polypyrolem v porovnání s textiliemi s kovovým nánosem vykázaly velmi nízkou elektromagnetickou stínící účinnost. Ale PPy textilie vykázaly současně s tkaninami s uhlíkovým nánosem vysokou absorbanci, která činila od 25 % do 45 % dopadajícího záření, protože odrážely mezi 55 % a 75 % dopadajícího záření. Zároveň byla v této práci také prostudována odolnost vůči pracím cyklům. Cyklus trval 90 minut při 40 stupních Celsia s pracím práškem, následně se textilie pověsily a sušily při pokojové teplotě. Povlak polypyrolem nanesené textilie byl poškozen. Hodnoty SE u PPY potažených tkanin po praní byly velmi zredukovány: ± 10 dB nižší, což představuje snížení o ± 20 %. V této studii byl také prozkoumán vliv zvýšení tloušťky textilie na elektromagnetické stínění v rozsahu zvýšení $\pm 20 \text{ g/m}^2$. PPY tkaniny vykázaly nárůst SE o 2 dB a 5 dB, kdy stínící účinnost vzrostla u pleteniny z 2,5 dB na 4,5 dB a u tkaniny o plošné hmotnosti 223 g/m^2 od 12 dB na 17 dB.

V následující studii [42] potvrdili vědci hypotézu studie [43], že optimální reakční teploty polypyrolu jsou mezi 0 až 10 °C. Tento trend vyšší vodivosti při nižší teplotě je obecně přičítán k nárůstu počtu vad struktury polymeru, pokud je získán při vyšší teplotě. Nízká teplota podporuje řádný růst řetězců s větší konjugací a menším množstvím závad. Při nízké teplotě byl polypyrol syntetizován ve formě hustých

sraženin, zatímco houbovitě sraženiny jsou vidět při vyšší teplotě. [44] Vzorek připravený při teplotě 60 °C má vodivost, která je o tři řády nižší než u polymerace při teplotě 5 °C. Polymerace se přirozeně začíná v první vrstvě kontaktu s monomerem na povrchu vláken. Vysoká teplota způsobila rychlé polymerace na povrchu, a tím brání pronikání oxidačního činidla. [45] Při nízké teplotě, polymerace probíhá velmi pomalu. [43] Pomalý proces umožňuje proniknutí polymeračních produktů dovnitř vláken a polypyrolu, které mají být uloženy rovnoměrně. [46] Proto budou v této naší studii následující pokusy zkoumány při reakčních teplotách v rozmezí 0 – 10 °C. Tato studie popisuje přípravu vodivé polyesterové textilie in-situ polymerací pyrolu. Nejvyšší vodivost se získá, když jsou polyesterové textilie namočené v 50% vodném roztoku pyrolu po dobu 2 hodin, suší na vzduchu po dobu 30 minut a namočí do polymerační lázně obsahující 1,0 mol/dm³ FeCl₃ po dobu 6 hodin při teplotě 5 °C. Nasycení vodivosti již bylo dosaženo při 2 hodinách difúzního času.

Stabilita polyesterových tkanin s nánosem polypyrolu v různých úrovních pH (1, 7, 13) byla zkoumána ve studii [47]. Zvýšení pH roztoku způsobilo pokles dopování částic a zvýšení povrchového odporu. Cyklická voltametrie (CV) ukázala postupnou ztrátu elektrické aktivity důsledkem zvýšení pH. Jak je z této studie zřejmé, tak zvyšování pH není vhodným polymeračním prostředkem k vytvoření textilie pro elektromagnetické stínění.

Následující studie jako předcházející studie [45] prokazuje rovněž negativní dopad vysokého pH na polymeraci textilních materiálů pro elektromagnetické odstínění SE. v práci [48] vyšší hodnoty pH způsobily pokles dopingového poměru množství dopantu ku počtu monomerních jednotek, ztrátu částí protiiontů a snížení jejich delokalizace. Stabilita nánosu na textilií v kyselině a v neutrálním prostředí lázně a po mytí textilií byla dobrá. Pouze při pH 13 byla ztráta protiiontů rozšířená a došlo k poklesu pravidelnosti rozmístění molekul dopantu, ačkoli tkanina působila stále jako vodivý materiál.

Povrchový odpor polyesterové tkaniny s polypyrolovou vrstvou vzhledem k tloušťce povlaku byl zkoumán v práci [49]. Tloušťka povlaku byla řízena nastavením koncentrací reakčních složek. Tloušťka vrstvy se zpočátku rychle zvýšila následovaným stálým nárůstem koncentrace pyrolu (Py) větší než přibližně 0,4 mg/ml. Povrchový odpor klesl z 10⁶ na 10³ Ω/m² s nárůstem pyrolové koncentrace z 0,2 mg/ml až koncentrace dosáhla hodnoty přibližně 0,4 mg/ml, nad kterou se míra poklesu snížila.

Z rešerše vyplývá, že najlepším riešením pre tvorbu polypyrolového nánosu je chemický spôsob, ktorý je veľmi rýchly, výhodný pre užití v priemyslových aplikáciách a pri procese je možné použiť rôzna oxidační činidlá. Ve štúdiách bolo preukázané, že vyšší stínící účinnosť má polypyrol než polyanilín, preto bude použit práve polypyrol k experimentálnym účelom. Najvhodnejším spôsobom je in-situ polymerace, pri níž sa polymerizační čas pohybuje okolo 6 hodín pri polymerační teplotě 0-10 °C. Polypyrolový nános lze uskutečniť na všetkých druhoch textilií (přirodní, syntetické, minerální vláknenné suroviny a tkané, pletené a netkané textilie). Není nutné, aby byl polypyrolový roztok s příliš vysokým pH – vysoké pH má za následek pokles dopování částic a zvýšení povrchového odporu, to je nežádoucí jev. Jak je psáno totiž v jiné studii, tak se zvyšujícím se povrchovým odporem klesá stínící účinnost SE.

7 Plánování experimentů

Metoda plánování experimentů nabízí nebývalé množství možností k poznání a zlepšování technologických i laboratorních procesů. Hlavní cíle jsou však dva:

- a) zjistit, které z faktorů, vstupujících do procesu, jsou pro sledovaný výstup rozhodující,
- b) nalézt optimální nastavení klíčových vstupů.

DOE vychází ze známého poznatku, že teprve při různém nastavení vstupů a pozorováním příslušné odezvy na výstupu, je možné proces poznat a poté zlepšovat. Nastavení vstupních parametrů (faktorů) je v DOE prováděno plánovitě a tvoří tzv. *plán experimentu*, jak je popsáno v [50]. Cílem vhodně navrženého experimentu je získání co nejvíce informací za co nejmenší cenu. Vstupní znalosti procesu mohou vyplývat ze zkušenosti nebo ze znalostí teoretických. K plánování experimentu bude využit program Minitab, protože, jak je napsáno v [51], tak je tento program uživatelsky nejprívětivější, co se týče jednoduchosti ovládání a je to patrně nejčastěji používaný SW pro analýzu dat v podnikové sféře.

Experimentální postupy lze rozdělit na:

- a) experimenty neplánované (živelné),
- b) experimenty plánované.

Plánované experimenty se řídí plánem experimentu. Plán experimentu stanovuje 3 charakteristiky („3P“):

- a) *počet* pokusů, ze kterých se experiment skládá,
- b) *podmínky*, za kterých se jednotlivé pokusy uskuteční,
- c) *pořadí* pokusů. [52]

Plánované experimenty se rozdělují dle počtu faktorů (jednofaktorové, vícefaktorové) a dále podle počtu úrovní jednotlivých faktorů (dvouúrovňové, víceúrovňové). Zatímco jednofaktorové experimenty jsou snadno pochopitelné, neumožňují vyšetřování toho, jak tento faktor ovlivňuje produkt nebo proces v přítomnosti dalších faktorů. Vztah, při kterém se mění vliv jednoho faktoru na výrobek nebo postup v závislosti na jednom nebo více dalších faktorech, se nazývá interakce. Často jsou vzájemné účinky faktorů důležitější než vliv jednotlivých faktorů.

V úplném faktoriálním experimentu se vystřídají všechny možné kombinace úrovně zkoumaných faktorů, v dílčím faktoriálním experimentu jsou některé kombinace vynechány. Faktory zahrnuté do experimentu mohou mít dvě nebo více úrovní. v jedné replice experimentu se každá kombinace úrovní objeví jen jednou. Pro rozhodování o existenci vlivu faktorů je však lepší, provedou-li se alespoň dvě repliky experimentu. Existují-li alespoň dvě repliky experimentu, lze při vyhodnocení použít t-test. v případě jedné repliky se doporučuje grafická metoda spočívající ve vynesení vypočtených efektů do pravděpodobnostního grafu.

Statistický model pro dva faktory A, B:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

kde

y_{ij} je odezva,

μ je společná úroveň pro oba faktory,

α_i označuje vliv i -té úrovně faktoru A,

β_j označuje vliv j -té úrovně faktoru B,

$(\alpha\beta)_{ij}$ je vliv interakce i -té a j -té úrovně faktorů A a B,

ε_{ij} představuje náhodnou chybu při i -té a j -té úrovni faktorů A a B.

Statistický model pro tři faktory A, B a C:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

kde

| | |
|---|---|
| y_{ijk} | je odezva, |
| μ | je společná úroveň pro oba faktory, |
| $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$ | označuje vlivy úrovní i, j, k faktorů A, B, C, |
| $(\alpha\beta)_{ij}, (\alpha\gamma)_{ik}, (\beta\gamma)_{jk}$ | označuje vlivy interakcí druhého řádu, tedy interakcí dvojic faktorů AB, AC, BC při odpovídajících úrovních i, j, k , |
| $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ | označuje vlivy interakce třetího řádu, tedy interakce všech tří faktorů dohromady při odpovídajících úrovních i, j, k , |
| ε_{ij} | představuje náhodnou chybu při i -té a j -té úrovni faktorů a a B. |

[53]

8 Experimentální část

Z předešlých teoretických znalostí o možnostech elektromagnetického odstínění a způsobů měření elektromagnetického stínění se došlo k závěru, že jako vhodný materiál pro elektromagnetické odstínění bude v této práci použita chemická látka polypyrol, známá jako zástupce vodivých polymerů. Tato látka bude nanесena na povrch textilie za využití předem naplánovaného experimentu.

Cílem experimentální části je připravit textilií se stínící účinností cca 10 – 20 dB při frekvenci 300 MHz – 1,5 GHz, což odpovídá odstínění více jak 90 % dopadajícího elektromagnetického pole. Jako substrát bude použita plošná textilie – tkanina. Pomocí in-situ polymerizace bude tkanina upravena vodivým polymerem – polypyrolem.

Jako oxidační činidlo byl na základě literární rešerše zvolen chlorid železitý. Jako aktivační přísada se obvykle používá látka s objemným aniontem, protože její vymytí ze struktury je pomalejší, než pro látky s anionty malými dobře rozpustnými ve vodě. Pro aktivaci je vyžadováno do jisté míry kyselé prostředí, použité dopanty mohou být i neutrální povahy, protože potřebnou kyselost zajistí kyselé produkty vznikající oxidační polymerací. Pro experimenty bude použita kyselina paratoluensulfonová (pTSA) jako vhodný dopant.

Mezi dílčí cíle práce patří vytipování možných vlivných procesních parametrů (faktorů) nanášení vodivého polymeru na výslednou elektromagnetickou stínící schopnost upraveného vzorku. S využitím metodiky plánovaného experimentu bude prozkoumán vliv jak hlavních faktorů, tak interakcí jednotlivých faktorů. Sestaven bude model, pomocí něhož bude možno získat textilní strukturu s danou stínící účinností. Provedena bude optimalizace nastavení parametrů nanášení polymerizačního roztoku pro získání textilie s konkrétní stínící účinností.

Experimentální část práce je možno členit na tři celky. Předmětem první části práce bylo seznámit se s in-situ polymerizací pyrolu na textilní substrát, ověřit výběr vhodného chemického složení polymerizační lázně a zejména vybrat vhodný textilní substrát, a to z hlediska materiálového složení. Dle studie [54] představují přírodní a syntetická vlákna ideální výchozí materiál pro různé aplikace, který má vysoký poměr povrchu ku celkové hmotnosti, dobré mechanické vlastnosti, odolnost vůči chemikáliím v drsných podmínkách, flexibilitu odpovídající koncovým požadavkům na použité textilie. Použití čistých vodivých polymerů je velice

obtížné z důvodu jejich špatných mechanických vlastností a zpracovatelnosti. Cílem první části práce tedy bude vytipovat materiál textilie, která bude použita jako substrát pro další nanášení polypyrolu.

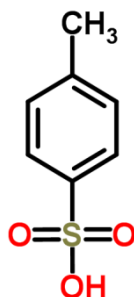
Předmětem druhé, nejrozsáhlejší oblasti experimentální části práce bylo pomocí plánovaného experimentu realizovat nanášení vodivého polymeru na zvolený textilní substrát při různém nastavení jednotlivých parametrů (faktorů). Jako potenciálně vlivné parametry byly na základě literární rešerše zvoleny: (A) teplota a (B) čas polymerizační lázně a (C) koncentrace monomeru. Zvolen byl plně faktoriální plán experimentu se třemi úrovněmi jednotlivých faktorů a to z toho důvodu, že není předpokládána lineární závislost výstupní veličiny na jednotlivých proměnných. Faktoriální plán se třemi úrovněmi umožní tvorbu kvadratického modelu. Upravené vzorky byly hodnoceny zejména dle efektivity elektromagnetického stínění. Na základě analýzy experimentu byly stanoveny statisticky významné faktory a interakce. Byl sestaven vhodný model a zjištěno optimálního nastavení polymerizačního procesu (teplota, čas, koncentrace monomeru) pro získání textilie se stínící účinností 15 dB. Textilie byly dále hodnoceny také dle elektrické vodivosti, hmotnosti vzorků a průměrné úrovně šedi vzorku. Sledována byla korelace mezi elektromagnetickým stíněním, elektrickou vodivostí a odstínem šedi vzorků.

Třetí oblast experimentální části práce je věnována ověření stanoveného nastavení úrovní faktorů pro získání textilie s konkrétní stínící účinností.

8.1 Použité chemické látky

Nejdůležitější chemickou látkou použitou v diplomové práci je pyrol (viz kapitola 5.2.1). V experimentální části práce byly použity následující sloučeniny:

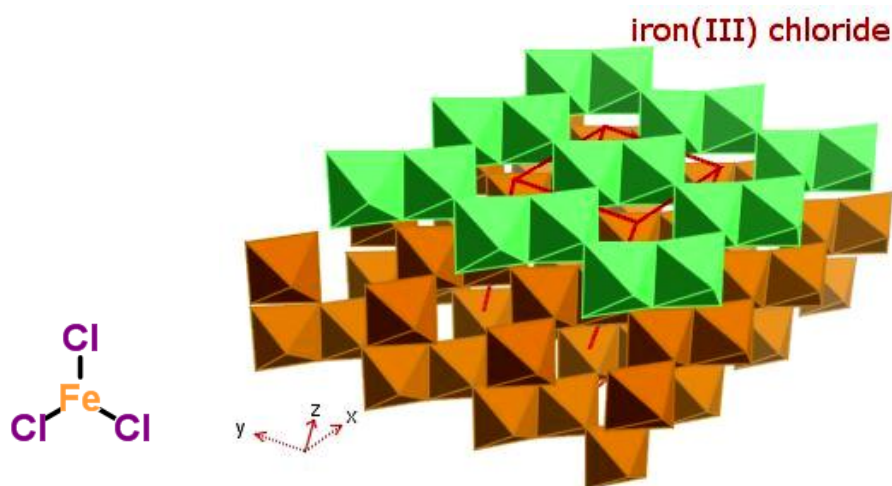
PTSA Kyselina paratoluensulfonová $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$



Obrázek 10: Kyselina p-toluensulfonová dle [29]

Používá se jako neoxidační katalyzátor při výrobě změkčovadel. Kyselina je rozpustná ve vodě a je vhodným prostředkem pro zlepšení barvitelnosti. Molekulární hmotnost je 190,21 g/mol. Teplota tání je 103 – 106 °C, teplota varu je 140 °C [29, 56]. Tato kyselina bude použita v experiment jako vhodný dopant. Tato látka byla použita jako vhodný dopant například ve studiích [36, 37, 39, 55].

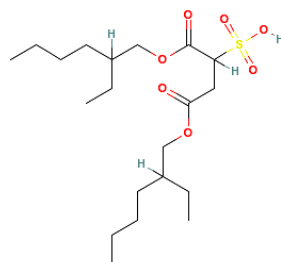
FeCl₃ Chlorid železitý (eng. Iron (III) chloride)



Obrázek 11: Chlorid železitý (molekula a krystalová struktura) dle [57, 58]

Molekulární hmotnost této kyseliny činí 162,2040 g/mol (Fe 55,845 g/mol, Cl 35,453 g/mol) Teplota tání je 306 °C, teplota varu 316 °C. Rozpustný ve vodě (hydrolyza) [29, 57]. Hexahydrát chloridu železitého (FeCl₃) byl použit v této studii, protože je levnější než většina příměsí používaných v pyrolové polymeraci, jako například anthrachinonová-2,6-disulfonová kyselina disodné soli, 2,6-naftalen disulfonová kyselina disodné soli a 1-naftalen sulfonová kyselina, jak je psáno ve studii [42].

Spolion 8 Kyselina dioctyl-sulfosucciniová, 4-bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate
C₂₀H₃₈O₇S



www.ChemDrug.com

Obrázek 12: Kyselina dioctyl-sulfosucciniová dle [59]

Používá se jako smáčedlo. Molekulární hmotnost je 422,57 g/mol. [59, 60]

8.2 Výběr vhodného substrátu

Cílem této části práce je výběr vhodného textilního substrátu z hlediska materiálového složení sloužícího jako podklad pro vodivou polypyrolovou vrstvu. Vhodný substrát je stanoven na základě výsledků hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti SE upravených vzorků různého materiálového složení. Koncentrace monomeru a teplota polymerizační lázně byly v tomto experimentu zachovány konstantní. Testován byl různý čas polymerizace. Pro všechny následující experimenty byl použit monomer pyrolu (98 %, výrobce Sigma Aldrich), oxidant chlorid železitý FeCl_3 (výrobce Lach-Ner s.r.o.) a dopant kyselina paratoluensulfonová pTSA (98,5 %, výrobce Sigma Aldrich).

8.2.1 Použité materiály

Pro primární pokus bylo vybráno 5 materiálů s obdobnou plošnou hmotností – 3 tkaniny plátňové vazby z přírodních vláken (100% bavlna, 100% len, 100% vlna) a 2 tkaniny v plátňové vazbě ze syntetických materiálů (100% viskóza a 100% polyester), jejichž vlastnosti jsou popsány v níže uvedené tabulce 6. Na těchto 5 materiálech, o rozměrech 10 x 10 cm a začištěných obnitkovacím stehem, byl nanesen vodný roztok pyrolu s oxidačním činidlem FeCl_3 a dopantem pTSA. Složení tohoto roztoku je popsáno níže v kapitole 8.2.2.

Tabulka 6: Vlastnosti a popis primárních textilních vzorků

| | Tloušťka (mm) | Dostava (cm^{-1}) | | Jemnost (tex) | | Plošná měrná hm. (g/m^2) | Objemová měrná hm. (kg/m^3) | Poróznost (%) |
|------------------|------------------|---------------------------------|----|------------------|----|---|--|------------------|
| | | O | U | O | U | | | |
| <i>Bavlna</i> | 0,31 | 26 | 19 | 32 | 25 | 174,4 | 562,6 | 63 |
| <i>Len</i> | 0,51 | 18 | 16 | 43 | 53 | 180,4 | 353,7 | 75,6 |
| <i>Vlna</i> | 0,58 | 21 | 18 | 46 | 54 | 201,6 | 347,6 | 73,5 |
| <i>Viskóza</i> | 0,26 | 34 | 26 | 17 | 16 | 175 | 673,1 | 54,8 |
| <i>Polyester</i> | 0,45 | 20 | 19 | 50 | 52 | 198,7 | 441,6 | 68,2 |

8.2.2 Složení nanášecího roztoku, jeho aplikace

Složení nanášecího roztoku vychází ze studie [61], kdy bylo při in-situ polymeraci použito 0,5 ml pyrolu, 2,5 g FeCl_3 a 1,5 g dopantu pTSA na 250 ml polymerizační lázně při polymerizačním čase 96 hodin s výsledkem elektromagnetické stínící účinnosti SE 5,65 dB. V tomto experimentu diplomové práce byla použita koncentrace monomeru pyrolu 2 g/l (0,03 mol/l), oxidačního činidla FeCl_3 10 g/l (0,062 mol/l) a dopantu pTSA 6 g/l (0,032 mol/l) a Spolion 8 jako smáčecí prostředek 1,8 g/l (0,004 mol/l). Objem vodného roztoku byl pro každý vzorek 250 ml.

Vodivost polypyrolového produktu připraveného ve vodě a alkoholu je podstatně vyšší než u polymerů připravených za stejných podmínek v organických rozpouštědlech, jako je chloroform a benzen [62]. Proto byla voda použita i v tomto zkoumání, navíc z důvodu netoxicky a její nízké finanční nákladnosti pro případné průmyslové aplikace.

Chemická reakce pyrolu s chloridem železitým



Textilie byla nejprve důkladně smočena v destilované vodě. Následně byl do vodní lázně s materiálem přidán pyrol. Souběžně byl mimo vytvořen vodný roztok FeCl_3 + pTSA, který byl následně přidán k smočenému vzorku s pyrolem. Roztok na textilií poté působil v rozsahu 12 h, 24 h, 48 h a 96 h. Teplota polymerizační lázně byla 20 °C. Během působení bylo nutné roztok s textilií míchat tak, aby pokrytí vrstvy polypyrolu bylo co nejrovnoměrnější. Bylo zjištěno, že tento postup pro průmyslové aplikace je ale nevhodný a to z důvodu obtížné manipulace s laboratorním sklem, které není uzavíratelné a hrozí únik roztoku do okolí.

8.2.3 Hodnocení elektromagnetického stínění vzorků

Pomocí metodiky popsané výše bylo připraveno celkem 20 vzorků různého materiálového složení s odlišným polymerizačním časem. Koncentrace monomeru a teplota polymerizační lázně byla zachována konstantní. Na upravených vzorcích byla hodnocena efektivita elektromagnetického stínění SE dle normy ASTM D4935. Měření probíhalo při teplotě vzduchu $t = 21,4$ °C a relativní vlhkosti vzduchu $RH = 40$ %. Jelikož měly vzorky různou strukturu, byly veškeré naměřené údaje vztaženy na

celkovou plošnou hmotnost jednotlivých tkanin. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 7, 8.

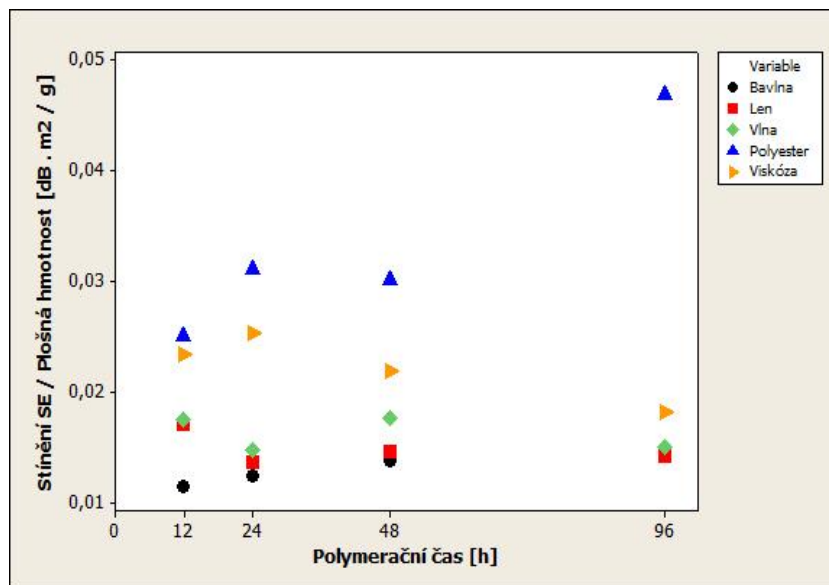
Tabulka 7: Účinnost elektromagnetického stínění SE textilních vzorků s nanesenou polypyrolovou vrstvou

| | Průměr | Stínění SE (dB) | | | |
|------------------|--|------------------------|------------|------------|------------|
| | <i>Plošná hmotnost (g/m²)</i> | <i>12h</i> | <i>24h</i> | <i>48h</i> | <i>96h</i> |
| <i>Bavlna</i> | 174,4 | 1,99 | 2,18 | 2,40 | 2,49 |
| <i>Len</i> | 180,4 | 3,09 | 2,47 | 2,64 | 2,58 |
| <i>Vlna</i> | 201,6 | 3,52 | 2,98 | 3,56 | 3,02 |
| <i>Polyester</i> | 175 | 4,39 | 5,45 | 5,28 | 8,21 |
| <i>Viskóza</i> | 198,7 | 4,64 | 5,03 | 4,37 | 3,63 |

Tabulka 8: Účinnost elektromagnetického stínění SE textilních vzorků s nanesenou polypyrolovou vrstvou s přepočtem na plošnou hmotnost

| Průměr | Stínění SE / Plošná hmotnost (dB.m² / g) | | | |
|--|--|-------------|-------------|-------------|
| | 12 h | 24 h | 48 h | 96 h |
| <i>Bavlna = 174,4 g/m²</i> | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| <i>Len = 180,4 g/m²</i> | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| <i>Vlna = 201,6 g/m²</i> | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| <i>Polyester = 175 g/m²</i> | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05 |
| <i>Viskóza = 198,7 g/m²</i> | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |

Na obrázku 13 je zobrazena efektivita elektromagnetické stínící účinnosti (vztahená na plošnou hmotnost) v závislosti na polymerizačním čase pro všechny vzorky. Z obrázku je patrné, že nejvyšší stínící účinnosti je dosaženo u polyesterové tkaniny. Předpokládá se, že čím vyšší bude polymerizační čas, tím vyšší bude množství vodivého polymeru ve struktuře tkaniny a tím vyšší bude stínící účinnosti. Pravidlo vyššího polymeračního času se potvrdilo u polyesterového a bavlněného vzorku.

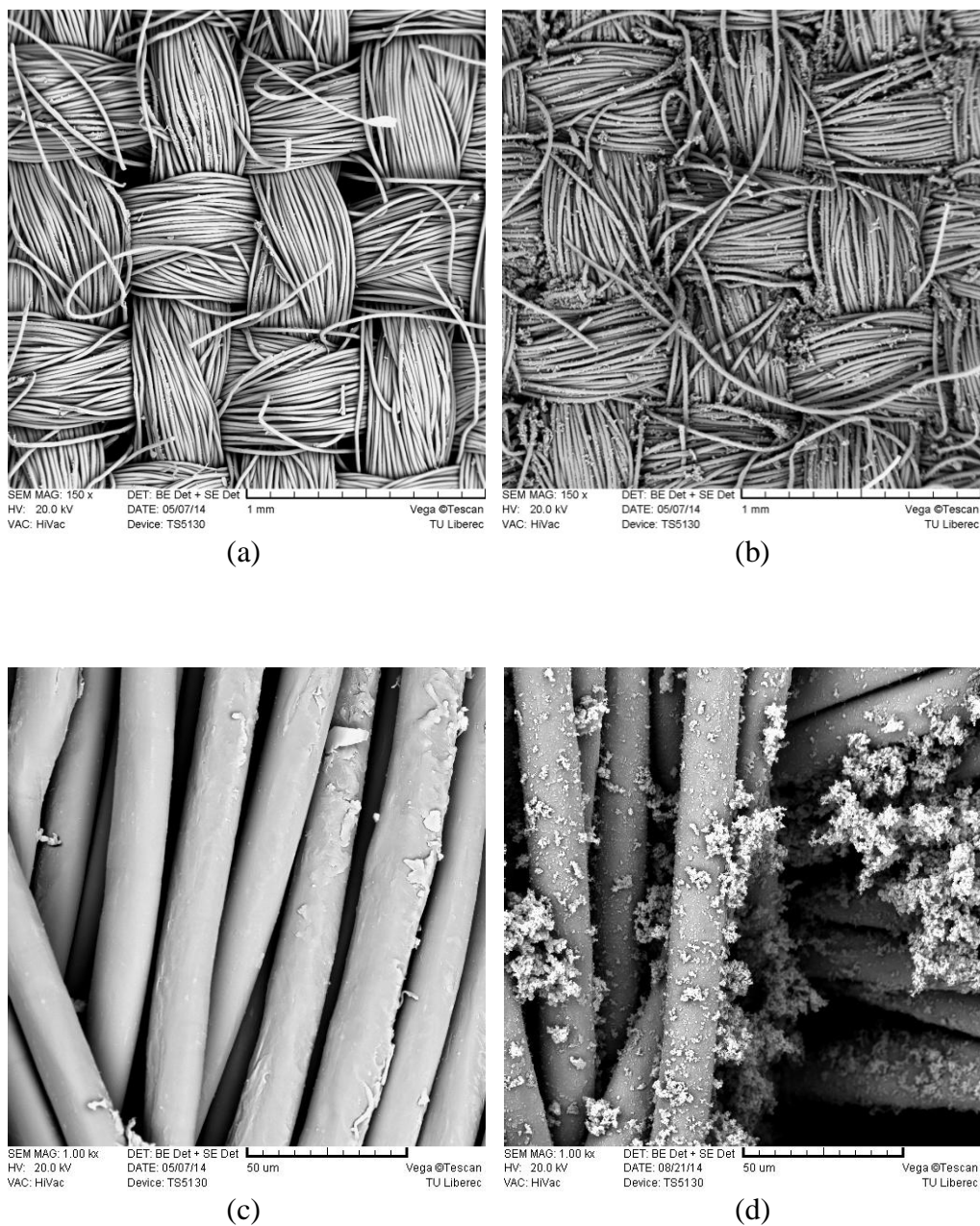


Obrázek 13: Elektromagnetická stínicí účinnost v závislosti na polymeračním čase

Z grafu elektromagnetického stínění je patrné, že nejvyšších hodnot elektromagnetického stínění SE dosahovala polyesterová tkanina o plošné hmotnosti 175g/m^2 při polymerizačním čase 96 hodin ve výši $0,0469\text{ dB.m}^2/\text{g}$. Je zřejmé, že stínicí účinnost mohou ovlivňovat i jiné parametry, například jemnost přízí, poróznost, dostava tkaniny, vazba tkaniny, plošné zakrytí, hustota vlákenné suroviny a dále. V další části experimentu bude proto vybrán materiál o stejné plošné hmotnosti, stejnou dostavou, ze stejné vlákenné suroviny – 100% polyesterová tkanina v plátňové vazbě. Budou stanoveny možné odchylky hodnot, variabilita materiálu a tkaniny.

8.2.4 Shrnutí výsledku

Jak je patrné z grafů a tabulky výše, tak nejlepší hodnoty elektromagnetického odstínění dosáhl vzorek tkaniny materiálového složení 100% polyester. Na základě tohoto šetření bude pro další experimenty využita textilie materiálového složení 100% polyester. Na obrázku 14 a 15 jsou uvedeny snímky polyesterových tkanin z elektronového mikroskopu SEM. V příloze jsou umístěná veškeré naměřené hodnoty elektromagnetického stínění, povrchové a objemové rezistivity bez přepočtu na plošnou hmotnost.

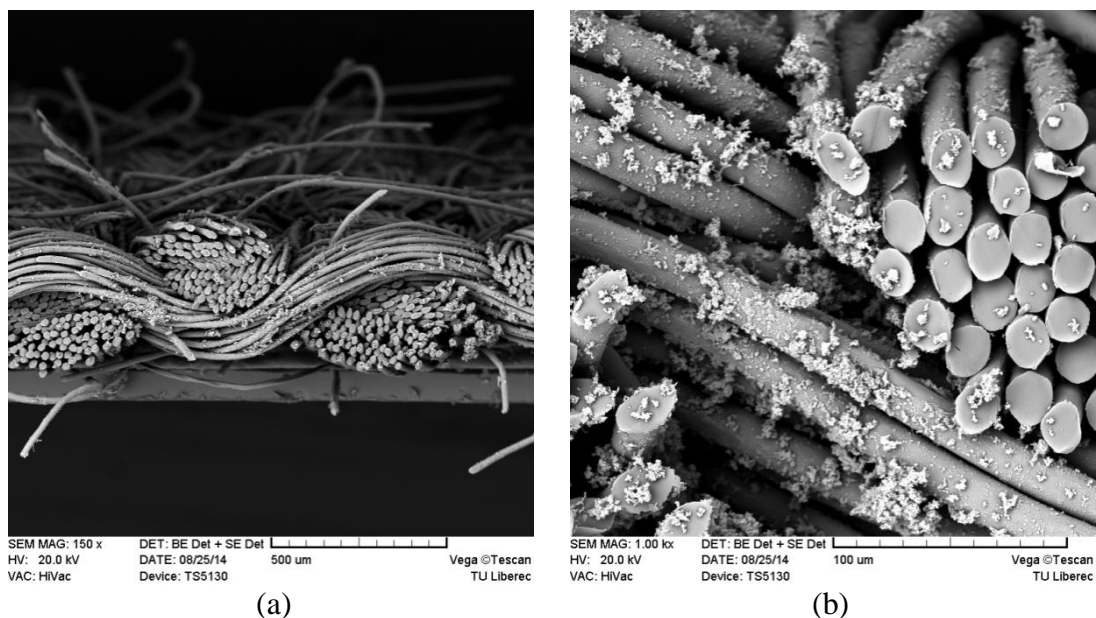


Obrázek 14: Polyesterová tkanina o plošné hmotnosti 175 g/m². (a) bez nánosů, (b) s nánosem PPy za polymeračního času 96 hodin při zvětšení 150x, (c) bez nánosů, (d) s nánosem po 96 hodinách, zvětšení 1000x

Z podélného zvětšení tkanin je patrné, že vznikl houbovitý nános vodivého polymeru na tkanině, což mohlo být způsobeno vysokou teplotou lázně při polymeraci, která dosahovala hodnoty 20 °C. Tento efekt je popsán například v práci [8, 9]. Při

každém nánosu polypyrolu tkaniny získaly černý odstín. Čím vyšší byl polymerační čas, tím tmavší byl i odstín.

Na obrázku 15 se nacházejí příčné řezy polyesterové tkaniny po nánosu polypyrolu a polymeračním čase 96 hodin.



Obrázek 15: Příčný řez polyesterové tkaniny o plošné hmotnosti 175 g/m², při zvětšení (a) 150x a (b) 1000x

8.3 *Tvorba elektricky vodivé vrstvy polypyrolem na polyesterovou textilii s využitím metod plánování experimentu*

Na základně literární rešerše byly jako vstupní parametry pro vytvoření elektricky vodivé textilie zvoleny polymerační teplota, čas a koncentrace monomeru. Výstupními parametry pro hodnocení vzorků bylo hodnocení efektivity stínění hodnoty dle ASTM D4935, měřené v dB. Zároveň byly vzorky hodnoceny z hlediska jejich elektrických vlastností po nanesení vodivé vrstvy – prostřednictvím povrchové a objemové rezistivity, z hlediska hmotnosti a barevného odstínu.

8.3.1 Použité materiály

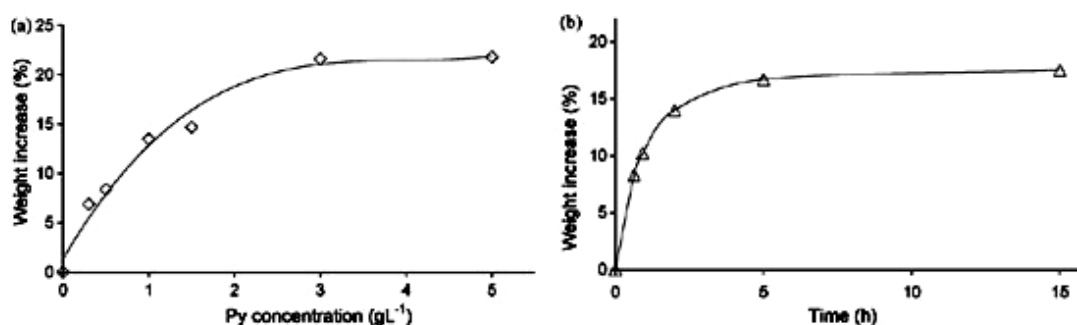
Textilní vzorky byly odděleny laserem Flexi MarcaTex Laser System o velikosti 13,5 x 14,5 cm, tímto způsobem vznikl pevný netřepivý okraj rozměrově přesné textilie za předpokladu dalšího mechanického namáhání. Každý textilní vzorek byl důkladně

před experimentem očištěn práním při 40 °C bez použití detergentů a jiných pracích prostředků kvůli eliminaci dalších vlivných parametrů.

Parametry podkladové textilie: Materiálové složení: 100% polyester
Plošná hmotnost: 175,8 g/m²
D_o: 25 nití/cm D_u: 22 nití/cm
Jemnost přízí T: 35 tex.

8.3.2 Návrh experimentu

Z literární rešerše bylo zjištěno, že závislost váhového přírůstku v procentech na jednotlivých parametrech (koncentrace pyrolu a polymerační čas) není lineární (viz obrázek 16) – faktoriální plán se dvěma úrovněmi pro každý faktor tedy není dostačující, a proto byl vytvořen pomocí metod plánovaného experimentu plný faktoriální experimentální design o třech faktorech a se třemi různými úrovněmi jednotlivých faktorů, tedy 3³ – 27 kombinací. Tvorba vzorku při každém z nastavení byla zopakována třikrát kvůli statistickému vyhodnocení. Celkově bylo tedy vytvořeno 81 textilních vzorků s elektricky vodivou vrstvou, vytvořenou polypyrolem, oxidačním činidlem FeCl₃ a dopantem pTSA.



Obrázek 16: Nelineární průběh závislosti koncentrace monomeru a polymeračního času na váhovém přírůstku dle [63]

Teplota byla nastavena na 5 °C, 15 °C a 25 °C. Polymerační doba byla nastavena na 1, 8 a 15 hodin a pyrol byl použit v následujících množstvích 0,2, 1 a 1,8 ml na předem stanovený objem vodné lázně.

8.3.3 Nanášení polypyrolu – složení lázně a postup

V tabulce 9 je definováno množství přísad pTSA a FeCl_3 dle jednotlivých koncentrací pyrolu. Toto množství bylo použito vzhledem k objemu polymerizační lázně každého vzorku, tj. 300 ml. Kvůli lepší smáčivosti textilie a rychlejší absorpci pyrolového roztoku bylo použito 0,2 g Spolionu 8 na každý textilní vzorek. Byl zvolen koncentrační poměr pyrolu, FeCl_3 a pTSA v poměru 1:5:3. Tento poměr byl zvolen z důvodu nejvyšších výsledných hodnot efektivity elektromagnetické stínící účinnosti dle studie [61]. v této studii bylo dosaženo stínící účinnosti až 17,73 dB.

Tabulka 9: Složení nanosové pyrolové lázně

| Množství pyrolu [ml] | 0,2 | 1 | 1,8 |
|----------------------|-----|---|-----|
| FeCl_3 [g] | 1 | 5 | 9 |
| pTSA [g] | 0,6 | 3 | 5,4 |

Z tabulky 9 je patrné, že v experimentech byla použita koncentrace monomeru pyrolu od 0,7 g/l do 6 g/l (0,01 mol/l – 0,089 mol/l), oxidantu FeCl_3 od 3,3 g/l do 30 g/l (0,021 mol/l - 0,185 mol/l), dále dopantu pTSA od 2 g/l do 18 g/l (0,011 mol/l – 0,095 mol/l) a smáčecího prostředku Spolion 8 v množství 0,7 g/l (0,01 mol/l).

Pro nanášení vodivého polymeru byly zvoleny kovové patrony, které se běžně používají k barvení vzorků. Patrony je možno uzavřít a jejich obsah snadno promíchat třepáním. Laserem oddělené a vyprané textilní vzorky byly vloženy do patron o objemu 300 ml současně se sklolaminátovou mřížkou, která zabránila přehybům textilie při procesu polymerování a absorpce pyrolové lázně. Tím mohl být vytvořen jednotný povrch vodivé vrstvy na textilií. Následně byla přidána destilovaná klimatizovaná voda do $\frac{3}{4}$ patrony a 0,2 g Spolionu 8. Patrona byla uzavřena a směs promíchána. Dále byl přidán pyrol v požadovaném množství. Po otevření patron byl přidán předem připravený roztok pTSA a FeCl_3 (množství dle tabulky 9) a substrát s textilií byl naposledy promíchán. Následně byly patrony uzavřeny a vloženy do klimatické komory Julabo F12 – EO (chlazení resp. ohřívání patron bylo realizováno vodou z důvodu vyšší účinnosti oproti chlazení vzduchem). Po uplynutí polymerační doby byl textilní vzorek šetrně vyprán tak, aby se odstranily zbylé sraženiny polypyrolu, které vznikají při překročení absorpčních limitů textilie. Textilní vzorek byl pak sušen při teplotě 22 °C.

8.3.4 Hodnocení efektivity elektromagnetické stínící účinnosti textilie

Textilní vzorky byly hodnoceny dle normy ASTM D4935, která je popsána v kapitole 3.3.1. V tabulce 10 jsou zobrazeny průměrné hodnoty efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE naměřených při frekvenci 1,5 GHz. Proměřováno bylo celé frekvenční pásmo v rozsahu od 30 MHz do 1,5 GHz, avšak frekvence 1,5 GHz byla zvolena pro další vyhodnocení, protože je dostatečně blízko frekvenci vysílačů mobilních telefonů.

Tabulka 10: Výsledné průměrné hodnoty efektivit elmg. stínící účinnosti [dB]

| | | 5 °C | | | 15 °C | | | 25 °C | | |
|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|---------|-------------|
| | | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin |
| 0,2 ml | \bar{x} | 0,09 | 1,66 | 2,14 | 0,60 | 1,14 | 2,20 | 0,75 | 1,22 | 1,86 |
| | IS_{95} | 0,05 | 0,16 | 0,25 | 0,12 | 0,17 | 0,32 | 0,09 | 0,14 | 1,24 |
| 1 ml | \bar{x} | 4,12 | 9,43 | 13,25 | 6,56 | 10,86 | 10,12 | 4,97 | 5,66 | 7,22 |
| | IS_{95} | 0,28 | 1,18 | 0,78 | 0,68 | 1,02 | 0,42 | 0,81 | 1,48 | 1,30 |
| 1,8 ml | \bar{x} | 9,42 | 12,90 | 13,44 | 10,25 | 16,66 | 14,78 | 8,30 | 8,49 | 8,09 |
| | IS_{95} | 0,44 | 2,55 | 1,90 | 0,53 | 2,51 | 0,80 | 2,07 | 0,21 | 1,34 |

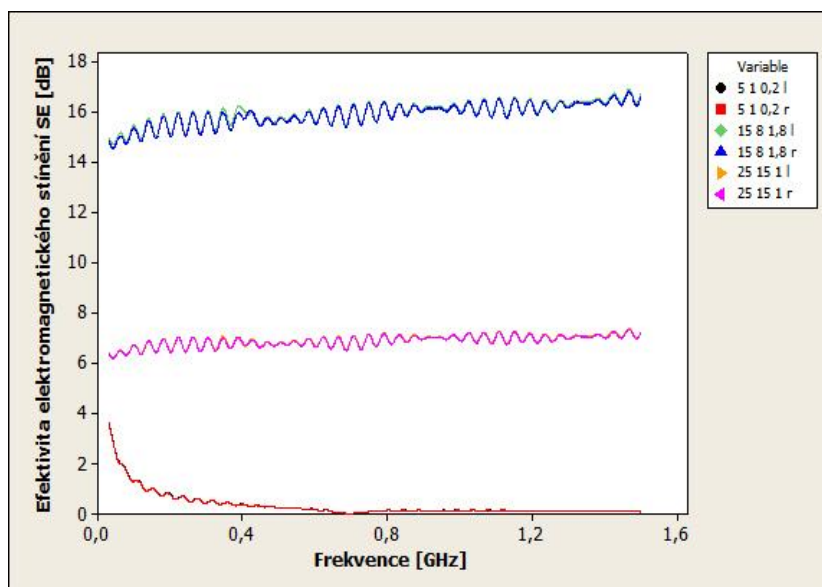
Naměřená data potvrdila, že čím větší množství pyrolu bylo nanášeno na textilní substrát, tím vyšší stínící účinnosti bylo dosaženo. Nejvyšší stínící účinnosti 16,7 dB bylo dosaženo za podmínek 15 °C, 8 h, 1,8 ml. Nejnižší stínící účinnosti dosáhla textilie při nejnižších úrovních všech faktorů, a to hodnoty 0,09 dB. Vyšších hodnot stínící účinnosti bylo dosaženo u polymeračního času 15 °C a následně 5 °C. Jak bylo popsáno v kapitole 8.2.4, tak při hodnotách vyšších než 20 °C vznikne houbovitá struktura nánosu a to může negativně ovlivnit výslednou stínící účinnost. Při teplotě 5 °C jsou hodnoty elektromagnetické stínící účinnosti všech vzorků vyšší než při teplotě 25 °C, proto lze konstatovat, že pokojová teplota není vhodným polymerizační hodnotou. Je zaznamenána hranice, po jejímž překročení hodnoty stínící účinnosti klesají (1 a 1,8 ml při 15 °C a 8 h). Tento jev je lépe dokreslen na obrázku 21 pomocí konturových grafů. Obecně lze říci, že čím vyšší je koncentrace monomeru, tím vyšší je dosaženo stínící účinnosti, a to u všech vzorků. Všechny hodnoty efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE při frekvenci 1,5 GHz se nacházejí v tabulce a

grafu v příloze, i se základní statistickou charakteristikou a vykreslením statistické nevýznamnosti rozdílu mezi lící a rubní stranou. Hodnoty stínící efektivity pro každou kombinaci s opakováním v celém frekvenčním pásmu od 300MHz do 1,5 GHz se nacházejí na přiloženém CD.

Frekvenční závislost elektromagnetické stínící účinnosti

Jak je zmíněno výše, všech 81 upravených textilních vzorků bylo proměřeno z lící i rubní strany. Bylo zjištěno, že rozdíl mezi efektivitou elektromagnetického stínění měřenou z rubní a lící stany vzorku není statisticky významný (viz obr. 17). To znamená, že uskutečněný postup nanášení je účinný z hlediska rovnoměrné tvorby vodivé vrstvy.

Na obrázku 17 je zobrazen graf stínící účinnosti SE v rozsahu frekvence od 30MHz do 1,5 GHz. Pro názornost je vybraný vzorek s vysokou stínící účinností (teplota 15 °C, čas 8 h, koncentrace monomeru 1,8 ml, modrá a zelená křivka), se střední stínící účinností (teplota 25 °C, čas 15 h, koncentrace monomeru 1 ml, růžová a oranžová křivka) a s nízkou stínící účinností (teplota 5 °C, čas 1 h, koncentrace monomeru 0,2 ml, červená a černá křivka). Označení vzorku „l“ (líc) a „r“ (rub) vypovídá o tom, z jaké strany bylo provedeno hodnocení vzorku.

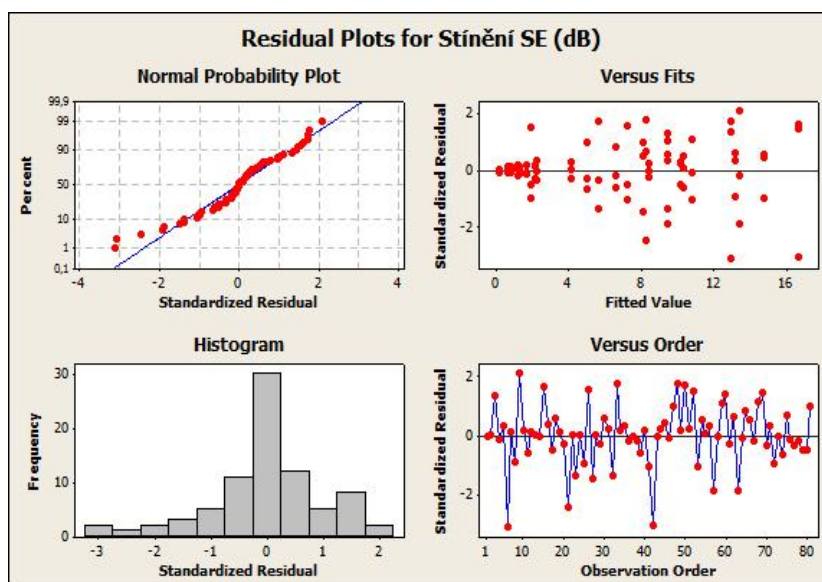


Obrázek 17: Závislost frekvence na elektromagnetickém stínění SE (porovnání nejvyšší, střední a nejnižší stínící účinnosti) na celém frekvenčním rozsahu

Průzkum vlivu hlavních faktorů a interakcí

Pomocí software Minitab 16 (Minitab Inc.) byl navržen a následně analyzován plně faktoriální design pro 3 faktory se třemi úrovněmi – jak je popsáno v kapitole 8.3.2. Studována byla elektromagnetická stínící účinnost vzorků pro frekvenci 1,5 GHz, která je blízká frekvenci mobilních telefonů.

Byla provedena analýza rozptylu naměřených hodnot stínící účinnosti pro veškeré kombinace vstupních parametrů. Na obrázku 18 jsou zobrazeny grafy reziduí, které potvrzují předpoklad normálního rozdělení. V tabulce 11 jsou shrnuty výstupy analýzy rozptylu. Pomocí analýzy rozptylu můžeme vyhodnotit významnost vlivu jednotlivých faktorů a interakcí. Z uvedených p -hodnot ($p < 0,05$) můžeme soudit, že všechny faktory i jejich interakce jsou statisticky významné.

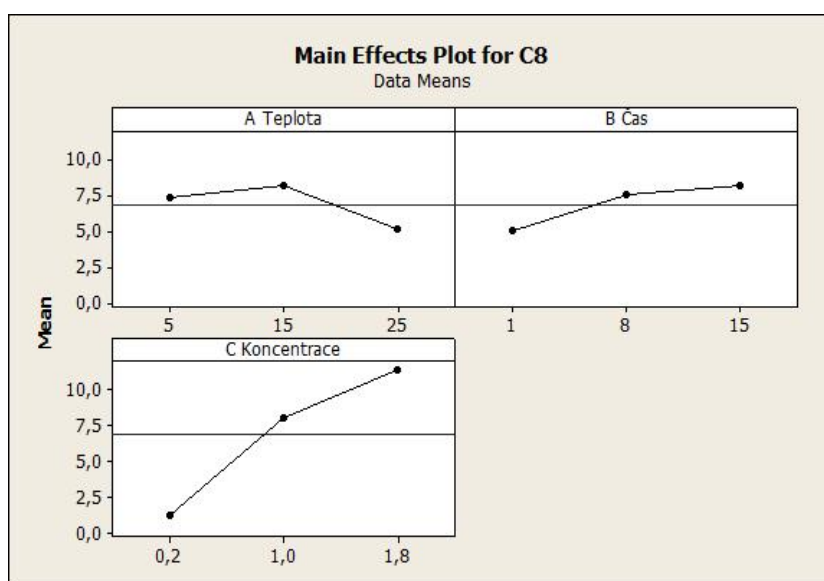


Obrázek 18: Reziduální grafy stínící účinnosti (normální pravděpodobnostní graf, histogram)

Tabulka 11: Výstup analýzy rozptylu

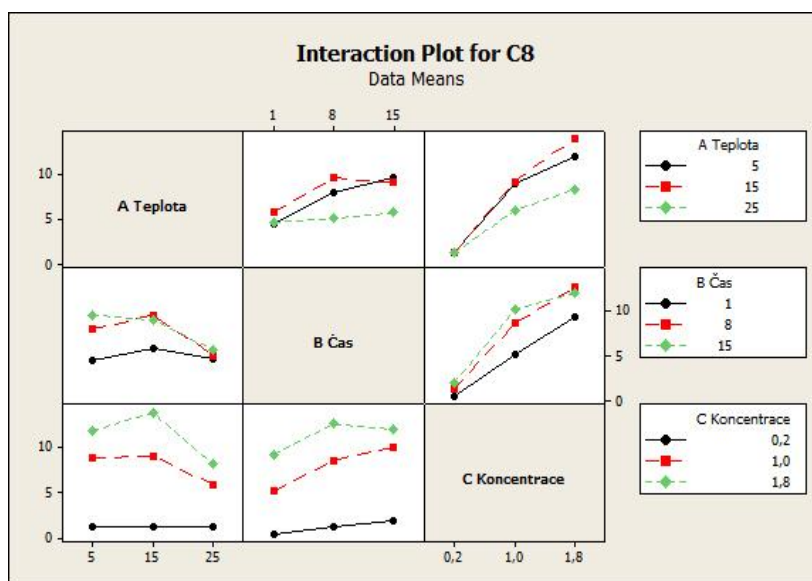
| <i>Source</i> | <i>DF</i> | <i>Seq SS</i> | <i>Adj SS</i> | <i>Adj MS</i> | <i>F</i> | <i>P</i> |
|--|-----------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
| <i>A Teplota (°C)</i> | 2 | 129,06 | 129,06 | 64,53 | 62,43 | 0,000 |
| <i>B Čas (h)</i> | 2 | 146,67 | 146,67 | 73,34 | 70,95 | 0,000 |
| <i>C Koncentrace (ml)</i> | 2 | 1420,77 | 1420,77 | 710,38 | 687,29 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)*B Čas (h)</i> | 4 | 50,68 | 50,68 | 12,67 | 12,26 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)*C Koncentrace (ml)</i> | 4 | 77,30 | 77,30 | 19,32 | 18,70 | 0,000 |
| <i>B Čas (h)*C Koncentrace (ml)</i> | 4 | 37,20 | 37,20 | 9,30 | 9,00 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)*B Čas (h)*C Koncentrace (ml)</i> | 8 | 34,38 | 34,38 | 4,30 | 4,16 | 0,001 |

Na obrázku 19 je zobrazen graf hlavních interakcí pro výstupní veličinu – efektivitu elektromagnetického stínění vzorků. Z obrázku je zřejmé, že nejvyšší vliv má koncentrace monomeru. Je to z důvodu strmosti – tzn. při vzrůstající koncentraci je docíleno největší změny elektromagnetické stínící účinnosti. Čím vyšší bude koncentrace monomeru, tím vyšší bude docíleno stínící účinnosti. Čas má také pozitivní vliv na výši stínící schopnosti, avšak nižší než je tomu u koncentrace. U teploty nelze vyhodnotit jednoznačný trend. Při zvýšení teploty z 5 °C na 15 °C dochází k mírnému vzrůstu SE, avšak při překročení 15 °C SE klesá. Z uvedeného se potvrzuje, že nejvýhodnější teplota polymerizační lázně bude v oblasti od 5 °C do 15 °C.



Obrázek 19: Interakce jednotlivých faktorů a stínící účinnosti

Byla sledována také interakce jednotlivých faktorů (teplota, čas, koncentrace), viz obr. 20. I v tomto případě je výstupní veličinou efektivita elektromagnetického stínění. Jak je patrné z obrázku 20, tak jednotlivé faktory mezi sebou interagují - přímky nejsou rovnoběžné a dokonce se v některých místech kříží – to naznačuje možné body, kdy dochází k převrácení interakcí. Interakce vzniká tehdy, pokud úroveň jednoho faktoru vyvolá změnu úrovně faktoru druhého. Obrázek 20 je v souladu s výsledky p -hodnot, tedy, že všechny faktory jsou statisticky významné a interagují mezi sebou. Nejvyšší interakci je možno pozorovat mezi teplotou a koncentrací a zároveň mezi koncentrací a časem.



Obrázek 20: Interakce faktorů při odezvě stínící účinnosti

Tvorba modelu

V software Minitab byla provedena regresní analýza a vypočítána regresní rovnice. Lineární model není pro popis závislosti vhodný, proto byl zvolen úplný kvadratický model. Zachovány byly veškeré faktory na základě předešlé analýzy významnosti vlivu hlavních faktorů a interakcí. V tabulce 12 jsou zobrazeny koeficienty a příslušná testovací statistika. Dle p -hodnot můžeme soudit o významnosti jednotlivých koeficientů.

Tabulka 12: Koeficienty úplného kvadratického modelu

| Term | Coef | SE Coef | T | P |
|--|----------|---------|--------|-------|
| <i>Constant</i> | -10,4699 | 1,17413 | -8,917 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)</i> | 0,8399 | 0,10327 | 8,133 | 0,000 |
| <i>B Čas (h)</i> | 0,9647 | 0,12863 | 7,500 | 0,000 |
| <i>C Koncentrace (ml)</i> | 15,2152 | 1,17277 | 12,974 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)*A Teplota (°C)</i> | -0,0215 | 0,00297 | -7,261 | 0,000 |
| <i>B Čas (h)*B Čas (h)</i> | -0,0260 | 0,00606 | -4,295 | 0,000 |
| <i>C Koncentrace (ml)*C Koncentrace (ml)</i> | -4,0013 | 0,46372 | -8,629 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)*B Čas (h)</i> | -0,0243 | 0,00407 | -5,968 | 0,000 |
| <i>A Teplota (°C)*C Koncentrace (ml)</i> | -0,1222 | 0,03564 | -3,428 | 0,002 |
| <i>B Čas (h)*C Koncentrace (ml)</i> | 0,1257 | 0,05092 | 2,469 | 0,019 |

$$S = 0,987737 \quad PRESS = 59,8575$$

$$R-Sq = 96,54\% \quad R-Sq(pred) = 93,93\% \quad R-Sq(adj) = 95,65\%$$

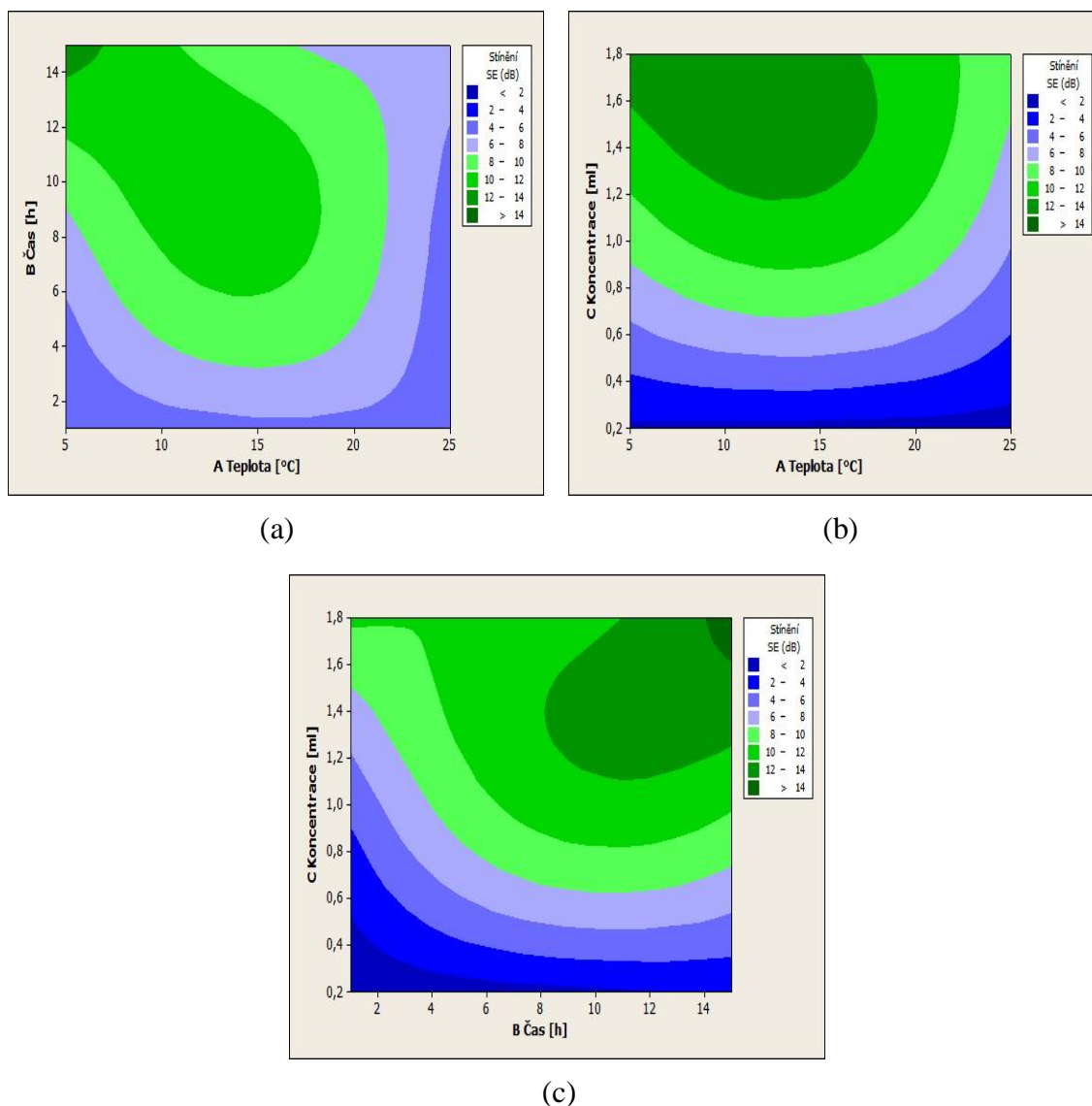
Koeficient determinace R^2 (R-Sq) vyjadřuje, jakou část variability závisle proměnné (vysvětlované proměnné) objasňuje regresní model. V našem případě model vysvětluje 96,54 % variability, což naznačuje, že model relativně objasňuje data dobře. Všechny faktory jsou statisticky významné, protože p -hodnoty nepřekračují předem stanovenou hladinu významnosti $\alpha = 0,05$. Podle koeficientů faktorů a jejich interakcí byla nalezena kvadratická rovnice, která popisuje závislost faktorů A, B, C na odezvě Y (rovnice 11).

$$Y(\text{odezva}) = -10,4699 + 0,8399 \cdot A + 0,9647 \cdot B + 15,2152 \cdot C - 0,0215 \cdot A^2 - 0,0260 \cdot B^2 - 4,0013 \cdot C^2 - 0,0243 \cdot AB - 0,1222 \cdot AC + 0,1257 \cdot BC, \quad (11)$$

kde Y představuje účinnost elektromagnetického stínění (dB), A je polymerizační teplota (°C), B je polymerizační čas (h) a C koncentrace monomeru pyrolu (ml).

Grafická reprezentace výsledků

Na obrázku 21 jsou zobrazeny konturové grafy. Na obrázku 21 (a) je zobrazena závislost SE na polymeračním čase a teplotě, na obrázku 21 (b) závislost SE na koncentraci na a na teplotě, na obrázku 21 (c) je závislost SE na čase a koncentraci. Tmavá zelená barva značí nejvyšší hodnoty stínící účinnosti SE, zatímco tmavě modrá představuje nejnižší úroveň SE.

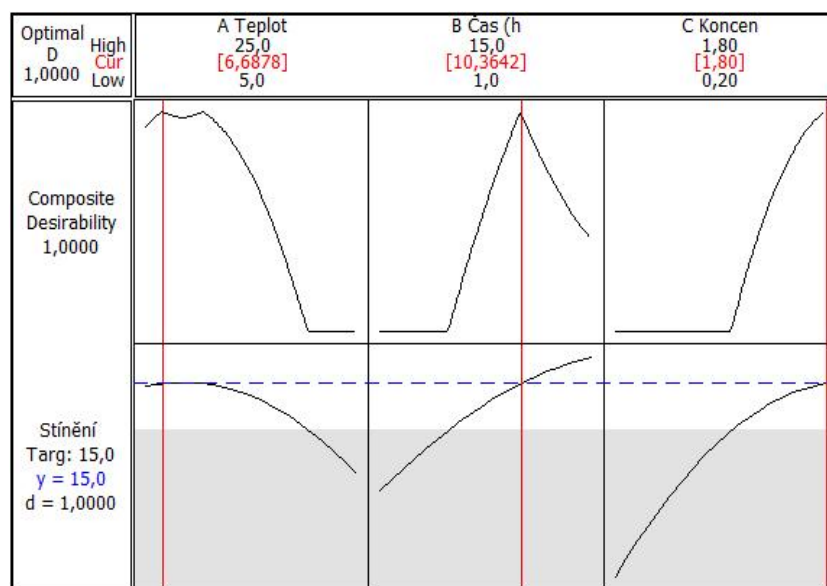


Obrázek 21: Konturové grafy závislostí vstupních faktorů na výstupní efektivitě elektromagnetické stínící účinnosti SE v dB

Z konturových grafů je zřejmé, že nejvyšších hodnot efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE bylo dosaženo (zleva) při polymeračních teplotách 15 °C, nejvyšší koncentraci 1,8 ml a polymeračním čase nad 8 hodin. Nejnižších hodnot bylo dosaženo při nejnižších úrovních všech tří faktorů (5 °C, 1 h, 0,2 ml).

Optimalizace úrovně jednotlivých faktorů pro získání vzorku s konkrétní stínící účinností

Pomocí statistického programu byly nalezeny optimální hodnoty pro každý faktor, hledáním požadovaných extrémů ve vícerozměrném prostoru, viz obrázek 22. Startovací hodnoty byly: 5 °C, 1 hodina a 0,2 ml pyrolu. Hledalo se řešení pro střední úroveň odezvy – v tomto případě stínění SE v hodnotě 15 ± 1 dB. Pro případné další šetření je možné startovací hodnoty změnit – například z důvodu přijatelných průmyslových podmínek při procesu polymerace.



Obrázek 22: Optimalizace vstupních faktorů v závislosti na předepsané hodnotě stínění 15 dB

Jak je tedy zřejmé z obrázku 22, tak optimální úroveň pro dosažení elektromagnetické stínící účinnosti 15 dB je vhodná polymerační teplota cca 6,7 °C, polymerační čas 10,4 hodin a množství pyrolu 1,8 ml.

8.3.5 Hodnocení elektrické vodivosti připravených vzorků

Elektrická vodivost vzorků byla hodnocena prostřednictvím povrchové a objemové rezistivity. Z teoretického rozboru plyne, že čím vyšší hodnoty rezistivity jsou (tzn. tím je nižší elektrická vodivost), tím je nižší stínící účinnost SE měřená v dB. Měření povrchového a vnitřního odporu bylo provedeno dle normy ČSN 34 1382. Vzorky musí být předsušeny 2 až 3 h při teplotě 60 a 65 °C a klimatizovány při teplotě $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, relativní vlhkosti vzduchu 40 % nebo 65 %. Výsledné povrchové a objemové odpory byly přepočítány na rezistivity dle vztahů uvedených v kapitole 4.3.

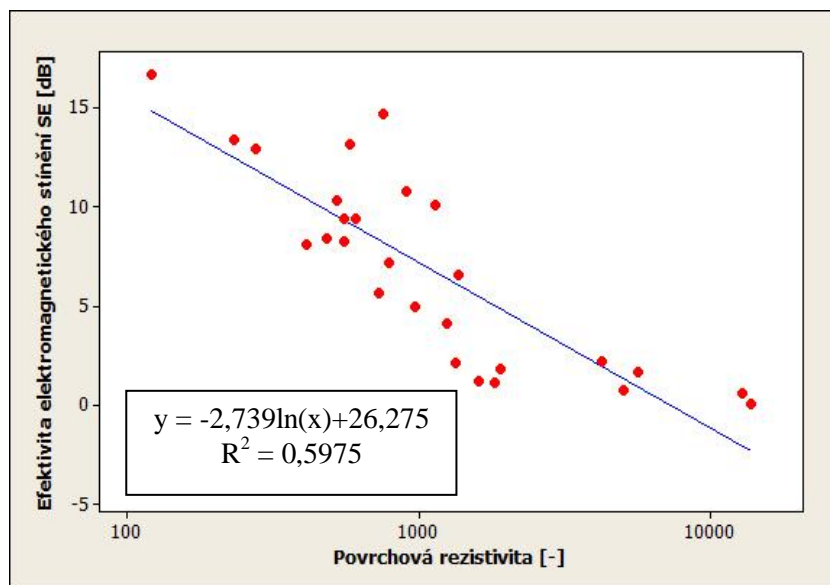
Povrchová rezistivita

Povrchová rezistivita všech vzorků byla proměřena při konstantních klimatických podmínkách, a to: $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $RH = 41\text{ }\%$. V tabulce 13 jsou zobrazeny výsledné průměrné hodnoty povrchové rezistivity všech vzorků vč. 95% intervalů spolehlivosti. Průměrné hodnoty jsou zobrazeny v násobcích základní jednotky, a to: $10^6\text{ }\Omega$.

Tabulka 13: Výsledky průměrné povrchové rezistivity [$\text{M}\Omega$]

| | | 5°C | | | 15°C | | | 25°C | | |
|--------------|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin |
| 0,2ml | \bar{x} | 137,04 | 5,62 | 1,33 | 12,87 | 18,08 | 42,15 | 4,99 | 1,61 | 1,90 |
| | IS_{95} | 74,09 | 2,89 | 0,13 | 3,86 | 0,14 | 2,12 | 2,3 | 0,12 | 0,16 |
| 1ml | \bar{x} | 1,25 | 0,55 | 0,58 | 1,36 | 0,91 | 11,41 | 0,96 | 0,73 | 0,79 |
| | IS_{95} | 0,20 | 0,12 | 0,05 | 0,21 | 0,09 | 0,16 | 0,09 | 0,74 | 0,13 |
| 1,8ml | \bar{x} | 0,61 | 0,28 | 0,23 | 0,52 | 0,12 | 0,76 | 0,55 | 0,48 | 0,41 |
| | IS_{95} | 0,09 | 0,09 | 0,04 | 0,09 | 0,04 | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,08 |

Na obrázku 23 je zobrazena korelace mezi efektivitou stínící účinnosti a povrchovou rezistivitou, převedenou dle logaritmického měřítka. Regresní rovnice má tvar: $y = -2,739\ln(x) + 26,275$. Pearsonovův korelační koeficient r činí -0,601, příslušná p -hodnota je 0,001. Korelační koeficient r může nabývat hodnot v intervalu (-1,1). Čím větší je absolutní hodnota r , tím těsnější je korelace mezi oběma proměnnými. Kladný korelační koeficient vyjadřuje pozitivní korelaci mezi veličinami, záporný korelační koeficient vyjadřuje negativní korelaci obou veličin. Pokud je hodnota korelačního koeficientu rovna nule, korelační závislost mezi veličinami neexistuje. Pokud je příslušející p -hodnota vyšší než hladina významnosti ($\alpha=0,05$), zamítáme nulovou hypotézu, že mezi sebou veličiny nekorelují a přijímáme alternativní hypotézu. Takže hodnoty menší než 0,05 dokazují korelaci mezi oběma proměnnými. To znamená, že povrchová rezistivita a stínící účinnost mezi sebou korelují. Čím je nižší hodnota povrchové rezistivity, tím je dosaženo větší hodnoty pro elektromagnetické stínění.



Obrázek 23: Korelace stínící účinnosti a povrchové rezistivity

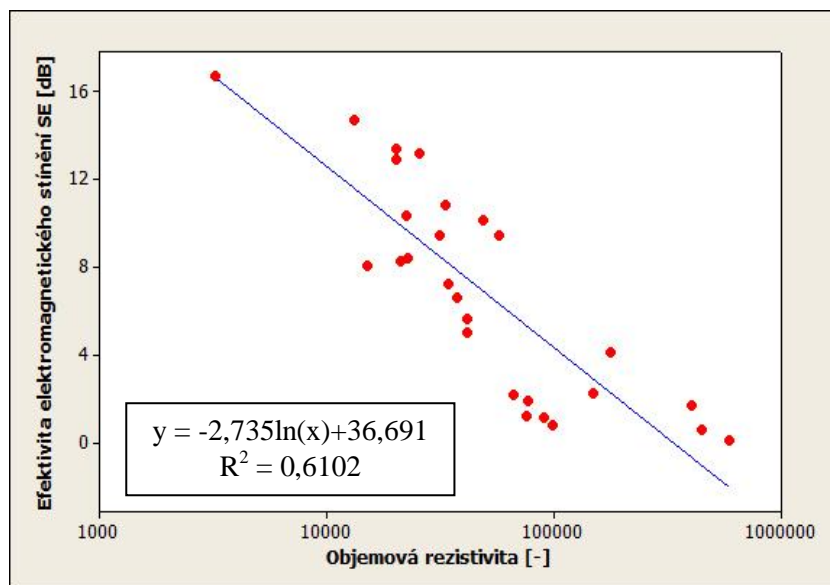
Objemová rezistivita

Objemová rezistivita všech vzorků byla proměřena při konstantních klimatických podmínkách a to: $t = 22\text{ °C}$ a $RH = 41\%$. V tabulce 14 jsou zobrazeny výsledné průměrné hodnoty povrchové rezistivity všech vzorků vč. 95% intervalů spolehlivosti. Průměrné hodnoty jsou zobrazeny v násobcích základní jednotky a to: $10^6\ \Omega$.

Tabulka 14: Výsledky průměrné objemové rezistivity [$M\Omega\cdot cm$]

| | | 5 °C | | | 15 °C | | | 25 °C | | |
|-------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin |
| 0,2ml | \bar{x} | 1592,675 | 408,91 | 66,63 | 452,04 | 91,59 | 150,11 | 99,57 | 76,63 | 77,76 |
| | IS_{95} | 395,68 | 139,49 | 7,71 | 130,14 | 8,40 | 77,45 | 10,22 | 5,32 | 8,47 |
| 1ml | \bar{x} | 180,19 | 58,09 | 25,91 | 37,83 | 33,32 | 49,43 | 41,73 | 41,86 | 34,60 |
| | IS_{95} | 115,83 | 11,33 | 3,36 | 10,08 | 6,09 | 7,44 | 4,60 | 3,69 | 4,84 |
| 1,8ml | \bar{x} | 31,78 | 20,48 | 20,28 | 22,43 | 3,24 | 13,24 | 21,22 | 22,75 | 15,27 |
| | IS_{95} | 7,97 | 3,38 | 4,04 | 2,52 | 0,82 | 3,89 | 3,56 | 3,11 | 2,42 |

Na obr. 24 je zobrazena závislost mezi efektivitou elektromagnetického stínění a objemovou rezistivitou, převedenou dle logaritmického měřítka. Regresní rovnice má tvar: $y = -2,735\ln(x) + 36,691$. Pearsonův korelační koeficient činí -0,604 a příslušná p -hodnota je 0,001, což potvrzuje předpokládanou korelaci mezi objemovou rezistivitou a elektromagnetickou stínící účinností SE. Přímka dokazuje, že čím menší je hodnota objemové rezistivity, tím větší elektromagnetické účinnosti je dosaženo.



Obrázek 24: Korelace stínící účinnosti a objemové rezistivity

Korelace povrchové a objemové rezistivity

Pearsonova hodnota korelace činila 0,938 a p-hodnota 0,000, což značí korelaci obou veličin. Výsledky povrchové a objemové rezistivity se nacházejí v příloze.

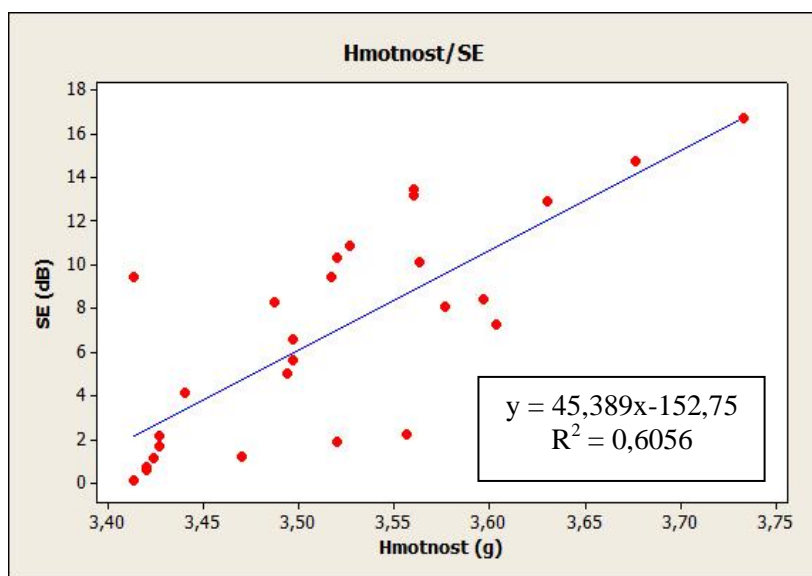
8.3.6 Hmotnost nánosu

Všech 81 textilních vzorků bylo zváženo při teplotě vzduchu 21 °C, relativní vlhkosti vzduchu 40 % a tlaku 100 kPa. Tabulka 15 obsahuje průměrné hodnoty hmotností textilie v gramech. Byla zvážena i textilie před nánosem vodivé vrstvy. Průměrná hodnota hmotnosti textilie bez nánosu činila 3,36g a interval spolehlivosti pro hladinu významnosti α 0,05 byl (3,35; 3,36).

Tabulka 15: Výsledná průměrná hmotnost textilie [g]

| | | 5°C | | | 15°C | | | 25°C | | |
|-------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin | 1 hodina | 8 hodin | 15 hodin |
| 0,2ml | \bar{x} | 3,41 | 3,43 | 3,43 | 3,42 | 3,42 | 3,56 | 3,42 | 3,47 | 3,52 |
| | IS_{95} | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,05 | 0,06 |
| 1ml | \bar{x} | 3,44 | 3,52 | 3,56 | 3,50 | 3,53 | 3,56 | 3,49 | 3,50 | 3,60 |
| | IS_{95} | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,02 |
| 1,8ml | \bar{x} | 3,41 | 3,63 | 3,56 | 3,52 | 3,73 | 3,68 | 3,49 | 3,60 | 3,58 |
| | IS_{95} | 0,01 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,03 |

Předpokládá se, že nejvyšší hmotnosti dle nejvyšších průměrných výsledků efektivity elektromagnetického stínění by měla dosahovat textilie s vodivou vrstvou připravenou za polymeračního času 8 hodin, teplotě 15 °C a koncentraci monomeru pyrolu 1,8 ml, což se v tomto experimentu potvrdilo (3,73 g \approx celkový nárůst hmotnosti o 11 %). Protože se intervaly spolehlivosti středních hodnot hmotností textilie bez nánosu a s nánosem u všech z 27 kombinací nepřekrývají, je hmotnostní rozdíl jednotlivých vzorků statisticky významný. Nanesení vodivé vrstvy na textilie ovlivnilo její celkovou hmotnost, ale to pouze řádově v setinách gramů. Celkové výsledky hmotnosti i se základní statistikou se nacházejí v příloze. Na obr. 25 je zobrazena korelace mezi hmotnostmi a efektivitou elektromagnetické stínící účinnosti SE. Regresní přímka má tvar: $y = 45,389x - 152,75$. Pearsonova hodnota pro tuto korelaci je 0,778 a příslušející p -hodnota 0,000. To znamená, že veličiny mezi sebou korelují (p -hodnota je menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$) a jedná se o rostoucí křivku korelace – to znamená, že čím větší je hodnota efektivity elektromagnetické účinnosti, tím větší je hodnota hmotnosti textilie.



Obrázek 25: Korelace mezi hmotnostmi a efektivitou elektromagnetické stínící účinnosti SE

8.3.7 Hodnocení stupně šedi textilie

Při hodnocení vzorků dle stínící účinnosti a elektrických vlastností byla vizuálně pozorována souvislost s odstínem šedi vzorku a výší elektrické vodivosti, resp. výší úrovně odstínění elektromagnetického pole. Z tohoto důvodu byla v této podkapitole

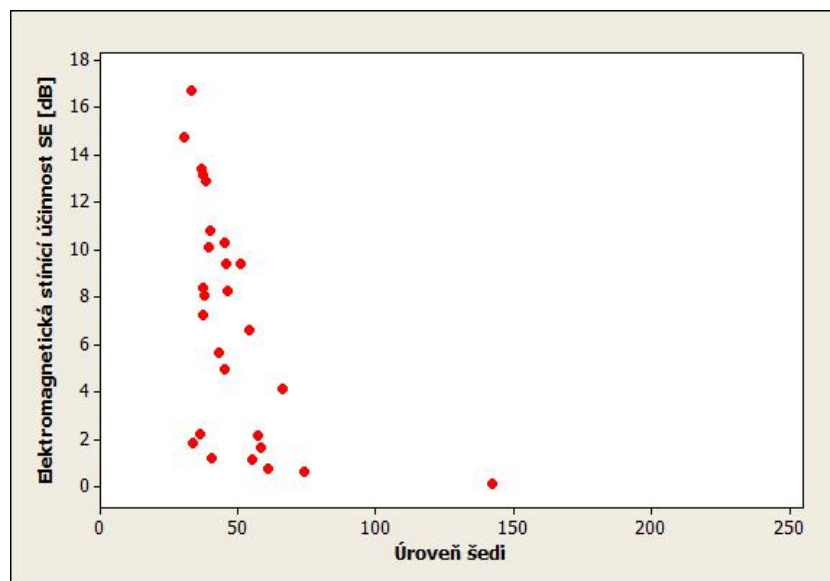
prozkoumána průměrná úroveň šedi pixelů nasnímaných obrazů vzorků. Každý textilní vzorek byl oskenován pomocí scanneru HP scanjet 5590, získaný barevný obraz byl převeden v software Matlab do šedotónového. Dále byl proveden ořez za účelem odstranění označení vzorků a bylo provedeno základní statistické vyhodnocení úrovní šedi jednotlivých pixelů obrazu. Škála úrovně šedi se pohybovala v rozmezí 0 - 256, kdy 0 znamená černou a 256 bílou barvu. V tabulce 16 jsou zobrazeny průměrné hodnoty úrovní šedi obrazů vč. 95 % intervalů spolehlivosti.

Tabulka 16: Průměrná úroveň šedi pro každou kombinaci tří faktorů [-]

| | 5°C | | | 15°C | | | 25°C | | |
|--------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | <i>1 hodina</i> | <i>8 hodin</i> | <i>15 hodin</i> | <i>1 hodina</i> | <i>8 hodin</i> | <i>15 hodin</i> | <i>1 hodina</i> | <i>8 hodin</i> | <i>15 hodin</i> |
| 0,2ml | 141,9 | 58,3 | 57,4 | 74,2 | 54,8 | 39,1 | 60,8 | 40,6 | 33,7 |
| 1ml | 66,3 | 45,8 | 37,3 | 54,1 | 40,1 | 36,1 | 44,9 | 42,9 | 37,4 |
| 1,8ml | 50,9 | 38,4 | 36,9 | 45,3 | 30,6 | 32,8 | 46,3 | 37,0 | 37,9 |

Jak je patrné z tabulky 16, tak nejvyšších hodnot úrovní šedi (tedy byly nejsvětlejší) dosahovaly textilní vzorky připravené za nejkratšího polymeračního času 1 hodiny. Zároveň klesající tendence úrovně šedi je zaznamenána v průběhu narůstajícího času – nejtmavší textilní vzorky byly připravené při 15i hodinovém polymeračním čase. Absolutně nejsvětlejším vzorkem byl vytvořen při teplotě 5 °C, polymeračním čase 1 hodiny a koncentraci monomeru pyrolu 0,2 ml, tedy nejnižších úrovních faktorů. Nelze ovšem tvrdit, že při nejvyšších úrovních faktorů vznikl vzorek nejtmavší.

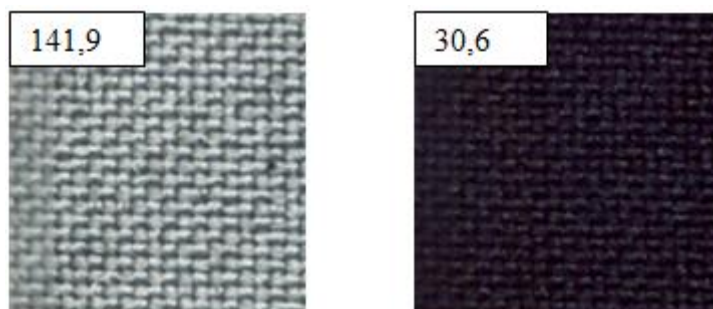
Nejtmavšího odstínu (úroveň šedi 30,6) dosáhl textilní vzorek připravený za podmínek 15 °C, 8 hodin a 1,8 ml, což ale odpovídá kombinaci, při níž bylo dosaženo průměrné nejvyšší efektivity elektromagnetické stínící účinnosti, jak je popsáno v kapitole 8.3.5. Obecně při vyšších hodnotách všech tří úrovní polymeračního času a koncentraci bylo dosaženo nižších hodnot úrovní šedi (světlejších výsledných textilních vzorků). Nestálých výsledků bylo dosaženo u polymerační teploty 25 °C, tam se nepotvrdila teze, že s vyššími hodnotami vstupních parametrů klesne úroveň šedi. Tato nestabilita je způsobena příliš vysokou polymerační teplotou, která podporuje nerovnoměrnost absorpce vodivých molekul na povrch textilie, jak bylo i napsáno v rešerši. Níže na obrázku 26 je sledována korelace mezi efektivitou stínící účinnosti a úrovněmi šedi.



Obrázek 26: Korelace mezi stínící účinností a úrovní šedi

Z grafu korelace je patrné, že čím vyšší hodnota úrovně šedi vznikla, tím bylo dosaženo nižší elektromagnetické účinnosti. Křivka korelace není lineární. Pearsonova hodnota pro korelaci udávala hodnotu $-0,535$ a p -hodnota byla ve výši $0,004$. To znamená, že veličiny mezi sebou korelují a křivka korelace je klesající.

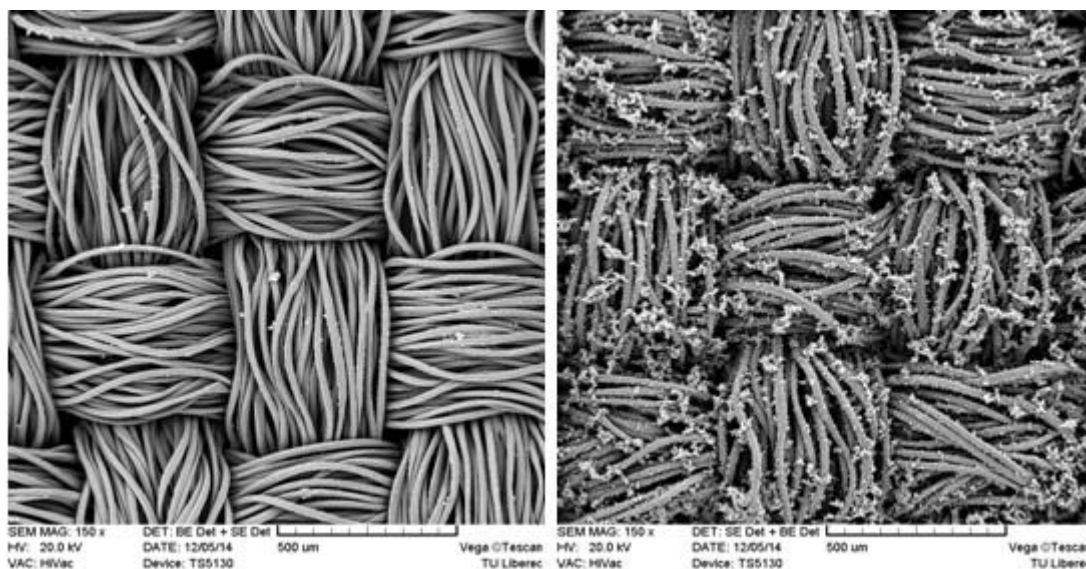
Pro názornost jsou na obrázku 27 zařazeny snímky upravených textilních vzorků – vzorek nejtmavší (nejnižší úroveň šedi a SE) a nejsvětlejší (nejvyšší úroveň šedi a SE).



Obrázek 27: Úroveň šedi - nejvyšší a nejnižší hodnota [-]

Snímky z elektronového mikroskopu

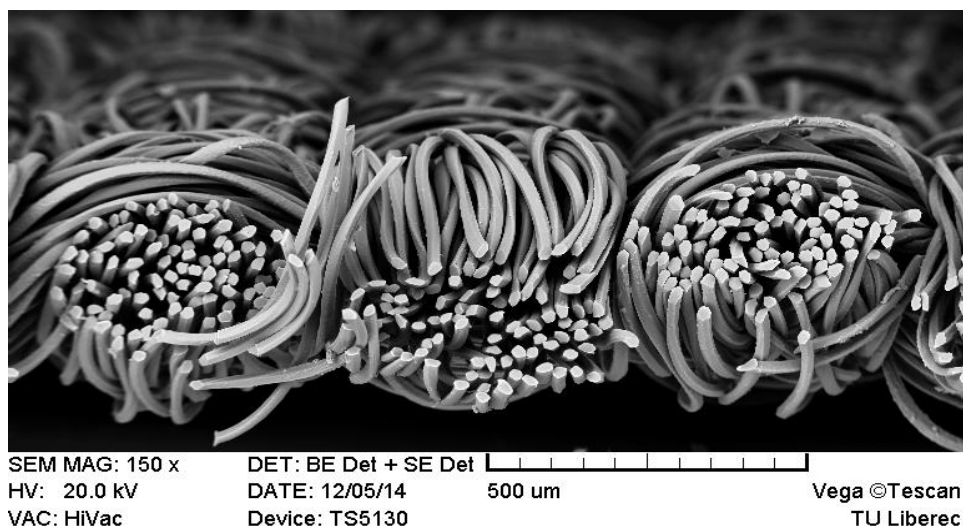
Pro lepší ilustraci jsou na obr. 28 doloženy snímky vytvořených textilií s elektromagnetickou stínící účinností z elektronové mikroskopie. Na obrázku 28 (a) se nachází textilie s nejnižší hodnotou elektromagnetické stínící účinnosti SE (5 °C, 1 hodina, 0,2 ml), na obrázku 28 (b) je vzorek s nejvyšší hodnotou SE (15 °C, 8 hodin, 1,8 ml). V obou případech je zvětšení 150x.



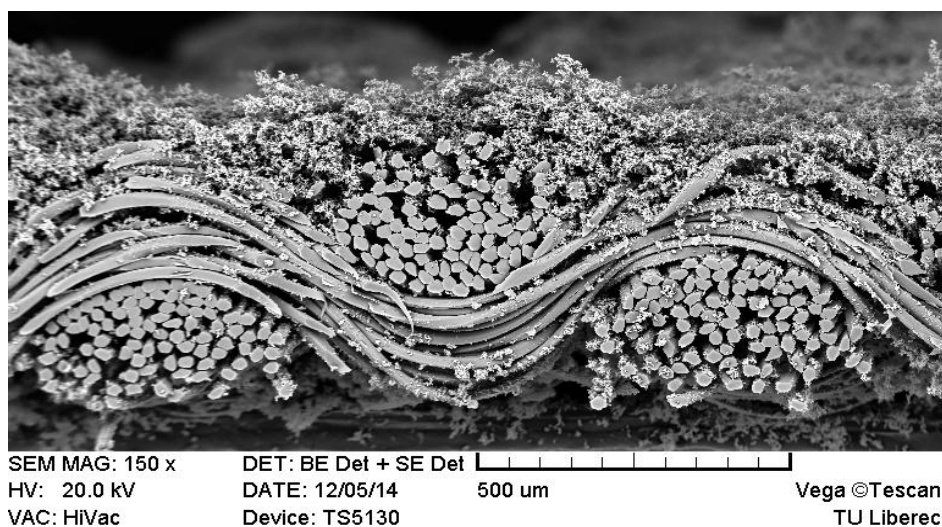
(a)

(b)

Obrázek 28: Snímky z elektronového mikroskopu vodivých textilií - podélný pohled



(a)



(b)

Obrázek 29: Snímky z elektronového mikroskopu vodivých textilií - příčný pohled

Na obrázku 29 (a) se nachází snímek textilie s nejnižší hodnotou elektromagnetické stínící účinnosti SE (5°C, 1 hodina, 0,2 ml), (b) nejvyšší hodnota SE (15°C, 8 hodin, 1,8 ml). *Zvětšení 150x*. Jak je patrné z těchto snímků, tak při nižší hodnotě stínící efektivity bylo dosaženo rovnoměrnějšího povlaku. Při ale nejvyšší stínící účinnosti byl vytvořen ale mohutnější nános na povrchu tkaniny.

8.3.8 Shrnutí

Předmětem této experimentální části práce bylo pomocí plánovaného experimentu realizovat nanášení vodivého polymeru na zvolený textilní substrát při různém nastavení jednotlivých parametrů (faktorů). Jako potenciálně vlivné parametry byly na základě literární rešerše zvoleny: (A) teplota a (B) čas polymerizační lázně a (C) koncentrace monomeru. Zvolen byl plně faktoriální plán experimentu se třemi úrovněmi jednotlivých faktorů a to z toho důvodu. Upravené vzorky byly hodnoceny zejména dle efektivity elektromagnetického stínění. Na základě analýzy experimentu bylo zjištěno, že vytipované vstupní parametry (polymerační čas, teplota, koncentrace) jsou velmi důležité – jsou statisticky významné. Nejvíce ovlivňuje polymerační proces a následně elektromagnetickou stínící účinností koncentrace monomeru pyrolu. Nejvyšší průměrná stínící účinnost byla zaznamenána při koncentračním čase 8 hodin, teplotě 15 °C a koncentraci 1,8 ml. Byla prokázána interakce všech faktorů – tedy že změna jednoho faktoru ovlivní faktor druhý. Byl sestaven vhodný regresní model a zjištěno optimálního nastavení polymerizačního procesu (teplota, čas, koncentrace monomeru) pro získání textilie se stínící účinností 15 dB. Textilie byly dále hodnoceny také dle elektrické vodivosti, průměrné úrovně šedi vzorku a průměrné hmotnosti vzorku. Sledována byla korelace mezi elektromagnetickým stíněním, elektrickou vodivostí, odstínem šedi vzorků a jejich hmotností. Byl potvrzen předpoklad, že čím vyšší je elektrická vodivost, tím je dosaženo vyšší stínící účinnosti. Tedy že při nižších hodnotách povrchové či objemové rezistivity (tj. vyšší elektrické vodivosti) je docíleno vyšších hodnot SE. Obecně lze říci, že čím vyšší hodnota úrovně šedi vzorek vykazuje (hodnota blízká 256), tím bylo dosaženo nižší elektromagnetické účinnosti. Stejný trend byl pozorován také u hmotnostního přírůstku polymeru na vzorku (čím více polymeru na vzorku, tím vyšší elektrická vodivost a elektromagnetická stínící účinnost).

8.4 *Ověření metodiky tvorby elektromagneticky stínící textilie*

Předcházející experimentální studie navrhla optimální řešení pro všechny faktory za účelem získání textilie s elektromagnetickou stínící účinností cca 15 dB při frekvenci 1,5 GHz. Tato výše elektromagnetická stínící účinnosti byla stanovena na základě literární rešerše, ze které vyplývá, že pro většinu obecných aplikací je dostačující odstínění min. 90 % dopadající elektromagnetické vlny, což odpovídá 10 dB. Provedená optimalizace bude ověřena v této podkapitole. Nad rámec ověření byl také zkoumán

vliv vrstev tzv. sendviče na výslednou efektivitu elektromagnetického stínění v dB a změřena propustnost pro vzduch upravených textilií, aby bylo možné navrhnout případné využití stínících textilií.

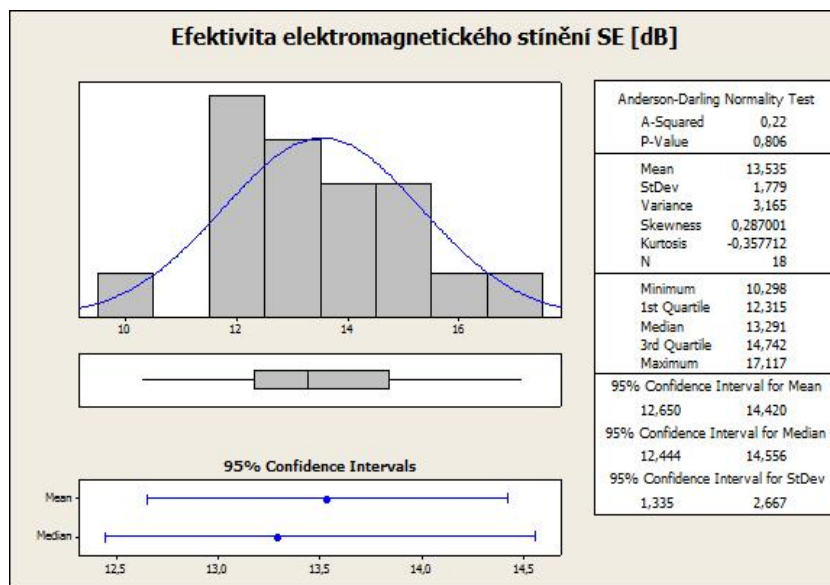
8.4.1 Použité materiály, parametry procesu

Na ověření metodiky tvorby stínící textilie byla použita optimalizační data z kapitoly 8.3.4 – tedy polymerizační čas 10,4 hodin, teplota 6,7 °C a koncentrace monomeru pyrolu 1,8 ml s odpovídajícím množstvím oxidačního činidla FeCl_3 a dopantu pTSA. Předpokládaná výstupní hodnota efektivitu elektromagnetického stínění byla nastavena na 15 ± 1 dB. Podkladovým materiálem pro nanášení vodivé vrstvy byla zvolena opět 100% polyesterová textilie o plošné hmotnosti $175,8 \text{ g/m}^2$ tak, jako při předcházejících experimentech. Postup realizace polymeračního roztoku a nánosu na textilní vzorek byl totožný tak, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách. Bylo provedeno 18 laboratorních experimentů za vzniku 18 vzorků. Vzniklé elektromagneticky stínící textilie byly hodnoceny dle ASTM D4935 a výsledky elektromagnetické stínící účinnosti zpracovány programem Minitab 16.

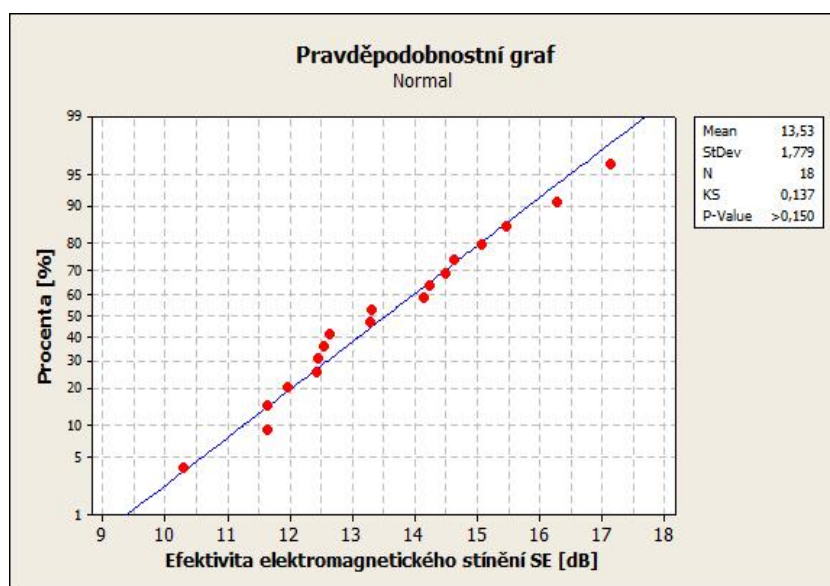
8.4.2 Hodnocení elektromagnetické stínící účinnosti

Na obrázku 30 jsou zobrazeny základní statistické údaje pro naměřené hodnoty elektromagnetického stínění všech 18 vytvořených vzorků na základě předchozí optimalizace. Byla ověřena normalita dat (viz obr. 31), protože p -hodnota příslušející k Anderson-Darlingovu testu normality je větší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Proces neobsahuje žádná vybočující data jak je patrné z krabicového grafu. Průměrná hodnota efektivitu elektromagnetické stínící účinnosti byla 13,53 dB a směrodatná odchylka 1,779 dB.

Konfidenční interval pro průměrnou hodnotu efektivitu elektromagnetické účinnosti je (12,650; 14,420) dB. Cílem bylo vytvořit vzorek se stínící účinností 15 ± 1 dB. Je zřejmé, že se 95% interval střední hodnot naměřené skupiny vzorků překrývá s intervalem cílovým, tudíž bylo dosaženo shody s cílovou hodnotou stínící účinnosti a potvrdilo se tak správné nastavení vstupních proměnných pro získání vzorku s konkrétní stínící účinností.



Obrázek 30: Základní statistické charakteristiky stínící efektivity SE pro ověřování optimalizovaných vstupních úrovní faktorů



Obrázek 31: Pravděpodobnostní graf stínící efektivity SE pro ověření vstupních optimalizačních úrovní faktorů

Vliv počtu vrstev na elektromagnetickou stínící účinnost SE

Cílem této části experimentu bylo prozkoumat vliv počtu vrstev na výslednou stínící účinnost celého systému tvořeného různým počtem vrstev materiálu. Za tímto účelem byly použity vzorky pro ověřování optimálního nastavení faktorů (textilie vytvořené při teplotě 6,7 °C, čase 10,4 h a koncentraci 1,8 ml). Tyto vzorky byly vrstveny a z hlediska elektromagnetického stínění byl proměřen tzv. sendvič obsahující 1 až 10 vrstev. I

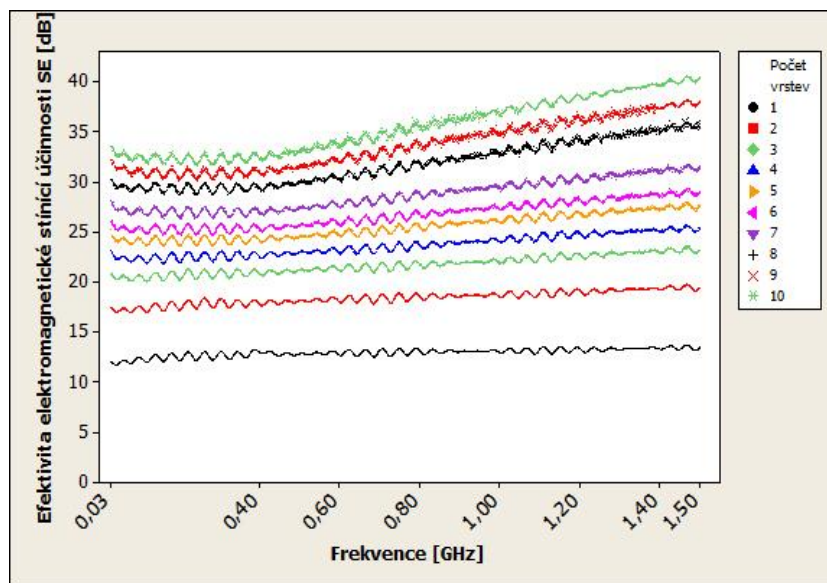
v tomto případě byla výsledná efektivita elektromagnetické stínící účinnosti sledována při frekvenci blízké frekvenci mobilních telefonů, což je 1,5 GHz. V tabulce 17 jsou zobrazeny naměřené hodnoty stínící efektivity.

Tabulka 17: Efektivita elektromagnetické stínící účinnosti ovlivněná počtem vrstev

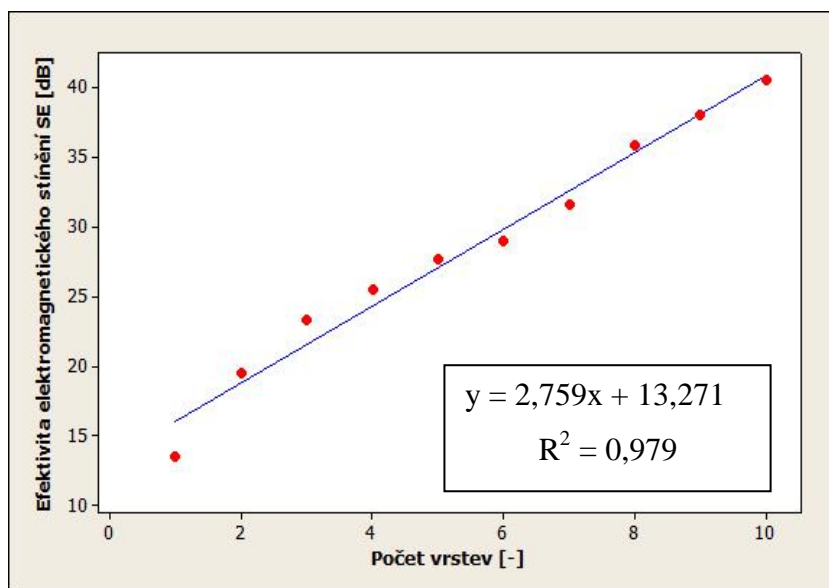
| <i>počet vrstev</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| <i>SE [dB]</i> | 13,54 | 19,50 | 23,27 | 25,45 | 27,68 | 28,98 | 31,62 | 35,87 | 38,05 | 40,49 |

Jak je patrné z tabulky 17, se vzrůstajícím počtem vrstev vodivých textilií roste i efektivita elektromagnetické stínící účinnosti SE. Při deseti vrstvách je dosaženo hodnoty až 40,5 dB. Na obrázku 32 je zobrazena frekvenční závislost stínící efektivity všech vzorků. Tzn. sendviče tvořené cca 1 – 3 vrstvami vodivé textilie vykazují téměř konstantní trend při zvyšování frekvence, zatímco vzorky s vyšším počtem vrstev ($P > 3$) vykazují zvýšení SE se zvyšující se frekvencí.

Na obrázku 33 je zobrazena závislost efektivity elektromagnetického stínění na počtu vrstev. Je zřejmé, že s vyšším počtem vrstev roste i efektivita elektromagnetické stínící účinnosti SE. Závislost je možno aproximovat lineární funkcí ve tvaru: $SE = 2,7 P + 13,27$, kde P je počet vrstev [-]. Koeficient determinace činí 97,9 %. Všechny výsledné hodnoty elektromagnetické stínící účinnosti na celém frekvenčním pásmu od 300 MHz do 1,5 GHz pro ověření optimálních nastavení úrovně faktoru a pro vliv vrstev vodivých textilií se nacházejí na přiloženém CD.



Obrázek 32: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti na počtu vrstev vodivé textilie



Obrázek 33: Závislost počtu vrstev vodivých textilií na stínící efektivitě SE

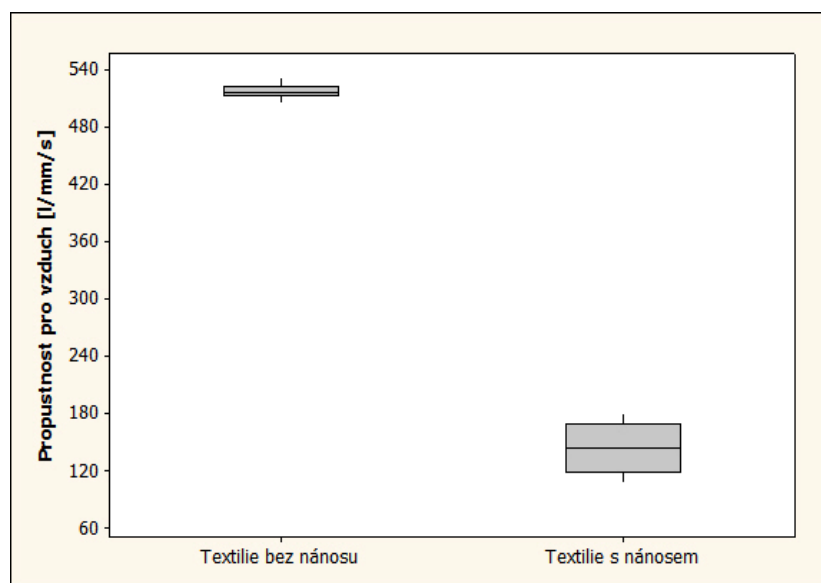
Permeabilita vzorků

Je zřejmé, že vybrané mechanické a komfortní vlastnosti upravených vzorků mohou být stěžejní pro konkrétní aplikaci vodivé textilie. Z přenosových vlastností byl zvolen parametr permeabilita vzduchu, která je měřítkem jak propustnosti materiálu pro vzduch, tak může dostatečně vypovídat i o propustnosti pro další média jako např. vodní páry. Z naměřených dat lze také odhadnout další charakteristiky, jak je např. poróznost.

Všech 18 textilních vzorků (tkanina s nánosem - polymerační čas 10,4 h, teplota 6,7 °C, koncentrace 1,8 ml pyrolu) bylo proměřeno při tlakovém spádu 200 Pa (technická textilie, pro oděvní účely by byl použit tlak 100 Pa), měřená plocha činila 20 cm². Byla proměřena i tkanina bez nánosu vodivé vrstvy pro statistické vyhodnocení. Měření proběhlo dle normy ČSN 800817, EN ISO 9237 (listopad 1996). Měřeno na přístroji FX 3300. V tabulce 18 je zobrazeno základní statistické vyhodnocení měření propustnosti pro vzduch. Propustnost vzduchu se snížila o 72,171 %, vzhledem k poměru průměrných hodnot (viz obrázek 34). Lze předpokládat, že se vzrůstající teplotou, časem, či koncentrací se propustnost vzduchu bude dále snižovat. Jak je patrné i z obrázku 34, tak intervaly spolehlivosti se nepřekrývají, tudíž nános na tkanině prodyšnost významně statisticky ovlivňuje.

Tabulka 18: Základní statistické charakteristiky propustnosti pro vzduch pro ověřování optimalizovaných vstupních úrovní faktorů

| | <i>Textilie bez nánosu</i> | <i>Textilie s vodivou vrstvou</i> |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <i>Průměr (l/mm/s)</i> | 517,93 | 144,13 |
| <i>Rozptyl ((l/mm/s)²)</i> | 53,35 | 625,12 |
| <i>Směrodatná odchylka (l/mm/s)</i> | 7,30 | 25,00 |
| <i>Confidence (l/mm/s)</i> | 3,70 | 12,65 |
| <i>IS horní (l/mm/s)</i> | 521,63 | 156,79 |
| <i>IS dolní (l/mm/s)</i> | 514,24 | 131,48 |



Obrázek 34: Krabicový graf propustnosti pro vzduch

8.4.3 Shrnutí

Bylo experimentálně ověřeno na 18 vzorcích, že analýzou plánovaného experimentu odhadnuté optimální úrovně faktorů 6,7 °C, 10,4 h a 1,8 ml byly vhodně stanoveny pro získání textilie se stínící účinností cca 15 dB při frekvenci elektromagnetického záření 1,5 GHz. Zároveň bylo provedeno studium vlivu počtu vrstev na stínící účinnost. Byl potvrzen předpoklad, že stínící účinnost roste s tloušťkou tzv. sendviče (resp. s počtem vrstev) a to lineárně. Z vybraných transportních vlastností byla otestována propustnost pro vzduch upravených vzorků a porovnána s propustností vzorku neupraveného. Bylo zjištěno, že se propustnost snížila o 72,1%. Tento jev je zapříčiněn tvorbou nánosu a zaplněním pórů jak mezi vlákny, tak mezi přízemi, tedy snížením porozity vzorků. Z uvedeného vyplývá, že textile zvodivěné pomocí polypyrolu nejsou vhodné pro tvorbu běžně užívaných oděvů, ale jako technických textilií.

8.5 *Vyhodnocení experimentální části, diskuze*

V první části byla vybrána na základě rešerše a počáteční zkoušky z hlediska materiálového složení 100% polyesterová textilie, která dosahovala nejvyšších hodnot stínící účinnosti. V této části bylo vytvořeno celkem 20 textilních vzorků, na které působil polymerační čas v rozsahu 12 h, 24 h, 48 h a 96 h. Nejvyšší stínící účinnosti bylo dosaženo při 96 hodinách, což je ale pro průmyslové aplikace nevhodným řešením z hlediska ekonomické nákladnosti procesu.

V experimentálních pokusech stanovených pomocí metod plánování experimentů bylo vytvořeno 27 kombinací úrovní faktorů – byl vytvořen plně faktoriální design pro tři faktory o třech úrovních. Celý proces byl třikrát replikován, celkem tedy bylo vytvořeno 81 textilních vzorků. Vodivá struktura byla vytvořena na 100% polyesterové tkanině o plošné hmotnosti $175,8 \text{ g/m}^2$. Výběr této textilie podléhal experimentálnímu ověření v kapitole 8.2.

Z experimentální části vyšlo najevo, že předem stanovené polymerační faktory čas, koncentrace a teplota jsou statisticky významné. Nejvíce ovlivňuje polymerační proces (charakterizovaný hodnocením elektromagnetické stínící účinnosti vzorku) koncentrace monomeru pyrolu. Mezi všemi faktory byla prokázána interakce. Pomocí regresní analýzy byl stanoven model druhého řádu pro odezvu stínící efektivity. Byla potvrzena teze, že čím nižších hodnot je dosaženo u povrchové a objemové rezistivity, tím více se zvýšila efektivita elektromagnetické stínící účinnosti. Potvrdilo se rešeršní zkoumání, že polymerace má probíhat při nižších teplotách než 15°C , nižších polymerizačních časech než 15 hodin a koncentracích monomeru pyrolu vyšších než 0,2 ml. Nejvyšší průměrné hodnoty stínící účinnosti SE při frekvenci 1,5 GHz bylo dosaženo při polymerační teplotě 15°C , čase 8 hodin a koncentraci 1,8 ml monomeru pyrolu, a to ve výši 16,66 dB. Nejnižší průměrné hodnoty stínící účinnosti bylo dosaženo při nejnižší koncentraci 0,2 ml, čase 1 h a teplotě 1°C (0,09 dB). Byl zkoumán hmotnostní přírůstek vlivem nanesení vodivé vrstvy. Hmotnost se statisticky změnila, ovšem jen řádově v setinách gramů.

Byla zkoumána úroveň šedi pro všech 27 kombinací. Bylo potvrzeno, že textilní vzorek o nejvyšší stínící účinnosti dosahuje nejtmašího odstínu (úroveň šedi blízka 0=černá barva), naopak nejsvětější byl textilní vzorek s nejmenší stínící účinností (úroveň šedi blízka 256=bílá barva).

Proběhlo stanovení optimálních úrovní faktorů pro získání vzorku s elektromagnetickou stínící účinností 15 dB při frekvenci 1,5 GHz. Výsledné hodnoty pro optimální úrovně faktorů byly 6,7 °C, 10,4 hodiny a 1,8 ml. Pro průmyslové aplikace je možné tyto počáteční teploty ještě upravit, například z důvodu nevyhovujícího klimatizování při nízkých teplotách. Při ověřování bylo vytvořeno 18 textilních vzorků a optimálnost hodnot byla prokázána. Při ověřování proběhla studie vlivu vrstvení textilních vodivých struktur na celkovou efektivitu odstínění elektromagnetického pole. Bylo zjištěno, že s rostoucím počtem textilních vrstev rostla i elektromagnetická stínící účinnost, která dosáhla při 10i vrstvách hodnoty 40,5 dB. Vzrůst je možno aproximovat přímkou. Z tohoto dobrého výsledku je doporučena další studie zkoumající vliv plošné hmotnosti na elektromagnetickou stínící účinnost.

Při zkoumání propustnosti pro vzduch vodivé textilie (připravené za podmínek 6,7 °C, 10,4 h a 1,8 ml) bylo zaznamenáno snížení prodyšnosti o 72,1 %. Z důvodu velkého poklesu propustnosti pro vzduch nejsou takto upravené textilie vhodné pro tvorbu běžných oděvů. Doporučeno je použití pro technické aplikace. Protože vodivé struktury dokážou dobře vést teplo, je možné tyto textilie použít jako kompozit do výhřevných struktur. Jak je psáno v kapitole 5.2.2, tímto způsobem vytvořené textilie lze využít díky svým dobrým adhezním vlastnostem jako aplikaci v trupu letadla. Zdá se, že textilie neztrácí svou funkčnost ani při namáhání ohybem a proto lze tyto textilie využít v prostorech, kam je těžké aplikovat kovové struktury. Tyto textilie lze využít jako maskovací vojenský prostředek, ve filtračním zařízení (statické rozptýlení), či jako pracovní oblečení v rafineriích. Velmi slibným prostředkem tvorby stínící aplikace se během experimentů stala i sklolaminátová mřížka, která dosahovala stínící účinnosti až 4,2 dB při frekvenci 1,5 GHz a polymeračních podmínkách 6,7 °C, 10,4 h a 1,8 ml monomeru pyrolu.

Pro další experimenty je doporučeno sledování stability vodivé vrstvy textilie za mechanického namáhání, či praní. Stabilitou povrchu vodivé textilie, vytvořeného chemicky či elektrochemicky se zabývá například studie [47, 64]. Možností vytvoření stabilního povrchu textilie by mohla být alkalická modifikace – trvalá hydrolyzace povrchu, při které se docílí zvýšení hydrofility povrchu. Další možností může být plazmatická modifikace povrchu textilie za účelem snížení povrchového odporu. Stabilitu povrchu je potřebné zkoumat z důvodu možného použití textilií ve zdravotnickém zařízení, jako například stínících clon.

9 Závěr

Byla provedena rozsáhlá literární rešerše, při níž se stanovily hlavní faktory ovlivňující polymeraci při tvorbě elektricky vodivé plošné textilie. Těmi faktory byly polymerační čas, teplota a koncentrace monomeru pyrolu. Z rešerše byla stanovena vhodná receptura polymerizačního roztoku. V počátečním experimentu byla zvolena 100% polyesterová textilie jako vhodný podklad z hlediska materiálového složení pro další experimentální zkoumání. Pro následující experimenty byly zvoleny 3 úrovně pro každý faktor. Celkem vzniklo 27 možných kombinací úrovní faktorů. Proces tvorby vodivé textilie byl třikrát replikován. Odezvou procesu byla zvolena efektivita elektromagnetické stínící účinnosti. Při zvyšující se koncentraci rostly i hodnoty stínící účinnosti. Vyšších hodnot stínící účinnosti dosahovaly textilie vytvořené při polymerační teplotě nižší 15 °C a času nižším než 15 hodin. Úroveň šedi potvrdila účinnost pyrolové černi – textilie s nejvyšší stínící účinností dosahovaly nejtmašího odstínu. Hmotnostní přírůstek byl statisticky významný, avšak řádově jen v setinách gramů. Potvrdila se interakce všech faktorů. Všechny faktory byly pro proces statisticky významné. Byla sledována korelace mezi rezistivitami a stínící účinností. Byla potvrzena teze, že se zvyšující se hodnotou povrchové či objemové rezistivity se zvyšuje i elektromagnetická stínící účinnost. Pomocí regresní analýzy byl stanoven model druhého řádu pro odezvu a stanoveny optimální hodnoty úrovní všech faktorů. Tento model lze využít pro přípravu vzorků s konkrétní elektrickou vodivostí, resp. stínící účinností. Podařilo se optimalizovat a následně ověřit vhodné nastavení procesních parametrů pro získání vzorku se stínící účinností 15 dB. Optimální stanovení hodnot bylo prověřeno a označeno za adekvátní. Při ověřovacím procesu bylo vytvořeno 18 textilních vodivých vzorků, které byly proměřeny i z hlediska jejich propustnosti pro vzduch a vlivu vrstev na výslednou elektromagnetickou stínící účinnost. Propustnost vzduchu se snížila a s přibývajícím počtem vrstev vodivých textilií lineárně rostla i hodnota elektromagnetické stínící účinnosti. V závěru experimentální části byly navrženy a diskutovány vhodné aplikace nově vzniklé textilie a možné další experimentální výzkumy.

Použitá literatura

- [1] NOVÁK, J. *Elektromagnetické pole a zdravotní rizika (I)*. [online]. Elektroinstalatér 5/2003. cit. 12. 11. 2014. url: <http://www.tzb-info.cz/1801-elektromagneticke-pole-a-zdravotni-rizika-i>.
- [2] PEKÁREK, L. *Neionizující elektromagnetická pole a záření*. [online]. cit. 12. 11. 2014. url: <http://www.sysifos.cz/index.php?id=vypis&sec=1154526554>.
- [3] VOŽEH, František. Elektrosmog: co o něm dosud víme a nevíme? © Vesmír, spol. s r. o., Na Florenci 3, 111 21 Praha 1. ISSN 1214-4029 březen 2014, č. 93. Dostupné z: <http://casopis.vesmir.cz/clanek/elektrosmog-co-o-nem-dosud-vime-a-nevime>.
- [4] Electromagnetic fields and public health (May 2006). In: *WHO: World Health Organization* [online]. © 2014 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs304/en/>.
- [5] BUREŠ, J.: *James Clerk Maxwell*. ConVERTER [online]. © 2002 [cit. 2014-11-12] Dostupné na Internetu <http://www.converter.cz/fyzici/maxwell.htm>.
- [6] Elektromagnetická vlna. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2014 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/358-elektromagneticka-vlna>.
- [7] VOJTĚCH, L. a J. HÁJEK. Measurement of Electromagnetic Shielding Efficiency of Planar Textiles in Frequency Range 100 kHz - 1,5 GHz. *Access server* [online]. [cit. 2014-08-30]. Dostupné z: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?>.
- [8] WIECKOWSKI, T. W., JANUKIEWICZ, M. J., *Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles*, [online], [2009], URL:<http://www.fibtex.lodz.pl/59_09_18.pdf>.
- [9] HEMMING, Leland H. *Architectural Electromagnetic Shielding Handbook: a Design and Specification Guide*. New York: IEEE Press Marketing, xviii, 222 s. ISBN 07-803-6024-9.
- [10] American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of planarMaterials*, Standard D4935-99, 1999.
- [11] Microwave Fixtures. *Microwave Measurement Systems* [online]. © 2011 [cit. 2014-08-30]. Dostupné z: <http://www.mmstech.com/microwave-fixtures.aspx>.
- [12] YILDIZ, Z., I. USTA a A. GUNGOR. Electrical properties and electromagnetic shielding effectiveness of polyester yarns with polypyrrole deposition. *Textile Research Journal*. 2012-11-27, vol. 82, issue 20, s. 2137-2148. DOI: 10.1177/0040517512449046. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517512449046>.
- [13] MIL-STD-285, Military Standard. Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes, Method of, Government Printing Office, Washington 1956.

- [14] *Specified Requirements of Electromagnetic Shielding Textiles*. [online]. Committee for Conformity Assessment on Accreditation and Certification of Functional and Technical Textiles. cit. 12.11.2014. url: <http://www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf>.
- [15] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005, 220 s. ISBN 80-247-1241-5.
- [16] PROKEŠ, Jan, Jaroslav STEJSKAL a Mária OMASTOVÁ. Polyanilin a polypyrrol - dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy*. 2001, č. 95, s. 484-492.
- [17] VYSOKÝ, Petr a Karel MALÝ. *Základy elektrotechniky: studijní modul 3. ; Základy elektroniky : studijní modul 4 : učební texty dle předpisu JAR-66*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-807-2043-156.
- [18] ČSN 34 1382. *Zkoušení elektrostatických vlastností materiálů a výrobků*. 13. 06. 1988.
- [19] NOBEL FOUNDATION. *The Nobel Prize in Chemistry, 2000 : Conductive polymers* [online]. c2009 [cit. 2014-12-7]. Dostupný z WWW: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/chemadv.pdf>.
- [20] COTTET, D. et al. Electrical Characterization of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 26(2), 2003, pp. 182–190.
- [21] CLINGERMAN, Matthew L., Julia A. KING, Kirk H. SCHULZ a Jeffrey D. MEYERS. Evaluation of electrical conductivity models for conductive polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002-02-07, vol. 83, issue 6, s. 1341-1356. DOI:10.1002/app.10014. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.10014>.
- [22] KIM, B., V. KONCAR, ENSAIT-GEMTEX a C. DUFOUR. Electrical, morphological and electromechanical properties of conductive polymer fibres (yarns). *Intelligent Textiles and Clothing*. Elsevier, 2006, s. 308. DOI: 10.1533/9781845691622.3.308. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845690052500164>.
- [23] BONALDI, Renata Redondo, Elias SIORES a Tahir SHAH. Electromagnetic Shielding Characterisation of Several Conductive Fabrics for Medical Applications. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*. 2010, vol. 2, issue 4, s. 237-245. DOI: <http://dx.doi.org/10.3993/jfbi03201006>.
- [24] PROKEŠ, Jan, Stanislav NEŠPŮREK a Jaroslav STEJSKAL. Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století. *Vesmír*. Praha: Euromedia Group, leden 2001, č. 80, s. 35-37. Dostupné z: <http://www.cts.cuni.cz/vesmir>.
- [25] LI, Xin-Gui, Ji LI a Mei-Rong HUANG. Facile Optimal Synthesis of Inherently Electroconductive Polythiophene Nanoparticles. *Chemistry - a European Journal*. 2009-06-22, vol. 15, issue 26, s. 6446-6455. DOI: 10.1002/chem.200900181. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/chem.200900181>.
- [26] YANG, Donghong a Zhiqiang GAO. Preparation of polyphenylene film on platinum electrode in molten biphenyl medium by potential cycling method.

- Synthetic Metals*. 2000, vol. 108, issue 2, s. 89-94. DOI: 10.1016/S0379-6779(99)00086-7. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677999000867>.
- [27] GUIMARD, Nathalie K., Natalia GOMEZ a Christine E. SCHMIDT. Conducting polymers in biomedical engineering. *Progress in Polymer Science*. 2007, vol. 32, 8-9, s. 876-921. DOI:10.1016/j.progpolymsci.2007.05.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670007000676>.
- [28] BALINT, Richard, Nigel J. CASSIDY a Sarah H. CARTMELL. Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering. *Acta Biomaterialia*. 2014, vol. 10, issue 6, s. 2341-2353. DOI:10.1016/j.actbio.2014.02.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1742706114000671>.
- [29] *ChemSpider: Search and share chemistry* [online]. Royal Society of Chemistry, © 2014 [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: <http://www.chemspider.com/>.
- [30] AROKOR HOLDINGS INC. *Chemicaland21: Chmeical Answer* [online]. ©2013 [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: chemicaland21.com.
- [31] WANG, Lin-Xia, Xin-Gui LI a Yu-Liang YANG. Preparation, properties and applications of polypyrroles. *Reactive and Functional Polymers*. 2001, vol. 47, issue 2, s. 125-139. DOI: 10.1016/S1381-5148(00)00079-1. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1381514800000791>.
- [32] KUHN, H.H., W.C. KIMBRELL, J.E. FOWLER a C.N. BARRY. Properties and applications of conductive textiles. *Synthetic Metals*. 1993, vol. 57, issue 1, s. 3707-3712. DOI: 10.1016/0379-6779(93)90501-M. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037967799390501M>.
- [33] BOUTROIS, J.P., R. JOLLY, C. PÉTRESCU a Marion I. TOBLER-ROHR. Process of polypyrrole deposit on textile. Product characteristics and applications. *Synthetic Metals*. 1997, vol. 85, 1-3, s. 150-262. DOI: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857092861.150>.
- [34] AVLONI, J., L. FLORIO, A.R. HENN, R. LAU, M. OUYANG a A. SPARAVIGNA. ELECTROMAGNETIC SHIELDING WITH POLYPYRROLE-COATED FABRICS. *Journal-ref: Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2007, č. 20, s. 241-254. Dostupné z: arxiv.org/pdf/cond-mat/0608664.
- [35] HÅKANSSON, Eva, Andrew AMIET a Akif KAYNAK. Electromagnetic shielding properties of polypyrrole/polyester composites in the 1–18GHz frequency range. *Synthetic Metals*. 2006, vol. 156, 14-15, s. 917-925. DOI: 10.1016/j.synthmet.2006.05.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677906001354>.
- [36] TAVANAI, H. a A. KAYNAK. Effect of weight reduction pre-treatment on the electrical and thermal properties of polypyrrole coated woven polyester fabrics. *Synthetic Metals*. 2007, vol. 157, 18-20, s. 764-769. DOI: 10.1016/j.synthmet.2007.08.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677907001828>.

- [37] MEHMOOD, Tariq, Akif KAYNAK, Abida MAHMOOD a Abbas KOUZANI. Optimization of polymerization conditions and thermal degradation of conducting polypyrrole coated polyester fabrics. *Fibers and Polymers*. 2012, vol. 13, issue 2, s. 153-158. DOI: 10.1007/s12221-012-0153-5. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12221-012-0153-5>.
- [38] KAYNAK, Akif a Eva HÅKANSSON. Short-term heating tests on doped polypyrrole-coated polyester fabrics. *Synthetic Metals*. 2008, vol. 158, 8-9, s. 350-354. DOI: 10.1016/j.synthmet.2008.02.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677908000465>.
- [39] MAITI, Syamal, Dipayan DAS a Kushal SEN. Characterization of electro-conductive fabrics prepared by in situ chemical and electrochemical polymerization of pyrrole onto polyester fabric. *Materials Science and Engineering: B*. 2014, vol. 187, s. 96-101. DOI: 10.1016/j.mseb.2014.05.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921510714001238>.
- [40] LIN, Tong, Lijing WANG, Xungai WANG a Akif KAYNAK. Polymerising pyrrole on polyester textiles and controlling the conductivity through coating thickness. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 479, 1-2, s. 77-82. DOI: 10.1016/j.tsf.2004.11.146. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609004017249>.
- [41] THIÉBLEMONT, J.C., M.F. PLANCHE, C. PETRESCU, J.M. BOUVIER a G. BIDAN. Stability of chemically synthesized polypyrrole films. *Synthetic Metals*. 1993, vol. 59, issue 1, s. 81-96. DOI: 10.1016/0379-6779(93)91159-Y. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037967799391159Y>.
- [42] MACASQUIT, Anilyn C. a Christina A. BINAG. Preparation of Conducting Polyester Textile by *in situ* Polymerization of Pyrrole. *Philippine Journal of Science*. December 2010, 139 (2), s. 189-196. ISSN: 0031 - 7683.
- [43] KASSIM A, BASAR ZB, MAHMU E. 2002. Effects of preparation temperature on the conductivity of polypyrrole conducting polymer. *Proc Indian Acad Sci (Chem Sci)* 114:2: 155-162.
- [44] TORRES-GOMEZ G, GOMEZ-ROMERO P. 1998. Conducting organic polymers with electroactive dopants, synthesis and electrochemical properties of hexacyanoferrate-doped polypyrrole. *Synthetic Metals* 98:95-102.
- [45] KIM MS, KIM HK, BYUN SW, JEONG SH, HONG YK, JOO JS, SONG KT, KIM JK, LEE CJ, LEE JY. 2002. PET fabric/polypyrrole composite with high electrical conductivity for EMI shielding. *Synthetic Metals* 126: 233-239.
- [46] KIM J, SOHN D, SUNG Y, KIM ER. 2003. Fabrication and characterization of conductive polypyrrole thin film prepared by in situ vapor phase polymerization. *Synthetic Metals* 132:309-313.
- [47] MOLINA, J., J. FERNÁNDEZ, A.I. del RÍO, R. LAPUENTE, J. BONASTRE a F. CASES. Stability of conducting polyester/polypyrrole fabrics in different pH solutions. Chemical and electrochemical characterization. *Polymer Degradation and Stability*. 2010, vol. 95, issue 12, s. 2574-2583. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.028>.

- [48] MOLINA, J., J. FERNÁNDEZ, A.I. del RÍO, J. BONASTRE a F. CASES. Chemical, electrical and electrochemical characterization of hybrid organic/inorganic polypyrrole/PW12O403– coating deposited on polyester fabrics. *Applied Surface Science*. 2011, vol. 257, issue 23, s. 10056-10064. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.06.140>.
- [49] LIN, Tong, Lijing WANG, Xungai WANG a Akif KAYNAK. Polymerising pyrrole on polyester textiles and controlling the conductivity through coating thickness. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 479, 1-2, s. 77-82. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2004.11.146>.
- [50] KLIMEŠOVÁ, E. a J. TOŠENOVSKÝ. Využití metody plánování experimentů při optimalizaci analytické metody stanovení adsorbovatelných organicky vázaných halogenů coulometricky. *Chemagazín*. 2011, roč. 21, č. 6.
- [51] MILLER, Ivan. *DOE: návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB®*. Vyd. 1. Praha: Interquality, 2010., 122 s. ISBN 978-80-902770-5-2.
- [52] TOŠENOVSKÝ, Josef. *Plánování experimentů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2592-2.
- [53] DOHNAL, Gejza. Úvod do navrhování a analýzy průmyslových experimentů. 2007, s. 1-75. projekt OP VK, reg. č. CZ.1.07/2.2.00/15.0097.
- [54] AVLONI, J., R. LAU, M. OUYANG, L. FLORIO, A.R. HENN a A. SPARAVIGNA. Polypyrrole-coated Nonwovens for Electromagnetic Shielding. *Journal of Industrial Textiles*. 2008-07-01, vol. 38, issue 1, s. 55-68. DOI: 10.1177/1528083707087834. Dostupné z: <http://jit.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1528083707087834>.
- [55] KAYNAK, Akif a Eva HÅKANSSON. Characterization of conducting polymer coated fabrics at microwave frequencies. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2009-02-27, vol. 21, 2/3, s. 117-126. DOI: 10.1108/09556220910933844. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/09556220910933844>.
- [56] AROKOR HOLDINGS INC. *Chemicaland21: Chmeical Answer* [online]. ©2013 [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: chemicaland21.com.
- [57] *Chemical Portal: Chemistry Online Education* [online]. Copyright 2014 webqc.org [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: <http://www.webqc.org/>.
- [58] *WebElements Periodic Table of the Elements* [online]. ©1993-2015 [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://www.webelements.com/>.
- [59] Dioctyl Sulfosuccinic Acid. In: *The PubChem Project* [online]. National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine, 2005-03-27 [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/summary/summary.cgi?cid=11339>.
- [60] *ChemDrug* [online]. ©2004-2010 [cit. 2014-08-28]. Dostupné z: <http://www.chemdrug.com/>.
- [61] ŠAFÁŘOVÁ, Veronika, Jan GRÉGR a Michal MARTÍNEK. Preparation of functional PET Fabric/Polypyrrole composite. *SCIENTIFIC PAPERS OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE*. September 25, 2012, č. 18, s. 117-131.

- [62] WALLACE G, SPINKS GM, TEASDALE PR, KANE-MAGUIRE LAP. 2003. Conductive electroactive polymer: assembly of polypyrroles. CRC Press, Boca Raton, Florida. Chapter 2.
- [63] CUCCHI, I., A. BOSCHI, C. AROSIO, F. BERTINI, G. FREDDI a M. CATELLANI. Bio-based conductive composites: Preparation and properties of polypyrrole (PPy)-coated silk fabrics. *Synthetic Metals*. 2009, vol. 159, 3-4, s. 246-253. DOI: 10.1016/j.synthmet.2008.09.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677908003366>.
- [64] THIÉBLEMONT, J.C., M.F. PLANCHE, C. PETRESCU, J.M. BOUVIER a G. BIDAN. Stability of chemically synthesized polypyrrole films. *Synthetic Metals*. 1993, vol. 59, issue 1, s. 81-96. DOI: 10.1016/0379-6779(93)91159-Y. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037967799391159Y>.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Elektromagnetická vlna [6]..... | 17 |
| Obrázek 2: Energie vznikající při dopadu na stínící kryt dle [7]..... | 19 |
| Obrázek 3: Standard ASTM D4935 dle [11] | 21 |
| Obrázek 4: Schéma válců koaxiálního přenosového vedení dle [12] – šířkové jednotky v mm | 22 |
| Obrázek 5: Standardní metoda MIL-STD 285..... | 23 |
| Obrázek 6: Rozdíl mezi izolanty, polovodiči a vodiči z hlediska uspořádání pásů [15] | 25 |
| Obrázek 7: Měrná elektrická vodivost vybraných látek dle [16]..... | 27 |
| Obrázek 8: Závislost vodivosti na teplotě pro stříbro (kov) a polyacetylen (vodivý polymer) dle [19]..... | 29 |
| Obrázek 9: pyrol dle [29]..... | 33 |
| Obrázek 10: Kyselina p-toluensulfonová dle [29] | 42 |
| Obrázek 11: Chlorid železitý (molekula a krystalová struktura) dle [57, 58] | 43 |
| Obrázek 12: Kyselina dioctyl-sulfosucciniová dle [59] | 43 |
| Obrázek 13: Elektromagnetická stínící účinnost v závislosti na polymeračním čase..... | 47 |
| Obrázek 14: Polyesterová tkanina o plošné hmotnosti 175 g/m ² | 48 |
| Obrázek 15: Příčný řez polyesterové tkaniny o plošné hmotnosti 175 g/m ² , při zvětšení (a) 150x a (b) 1000x | 49 |
| Obrázek 16: Nelineární průběh závislosti koncentrace monomeru a polymeračního času na váhovém přírůstku dle [63] | 50 |
| Obrázek 17: Závislost frekvence na elektromagnetickém stínění SE (porovnání nejvyšší, střední a nejnižší stínící účinnosti) na celém frekvenčním rozsahu | 53 |
| Obrázek 18: Reziduální grafy stínící účinnosti (normální pravděpodobnostní graf, histogram) | 54 |
| Obrázek 19: Interakce jednotlivých faktorů a stínící účinnosti | 55 |
| Obrázek 20: Interakce faktorů při odezvě stínící účinnosti | 56 |
| Obrázek 21: Konturové grafy závislostí vstupních faktorů na výstupní efektivitě elektromagnetické stínící účinnosti SE v dB | 58 |
| Obrázek 22: Optimalizace vstupních faktorů v závislosti na předepsané hodnotě stínění 15 dB | 59 |
| Obrázek 23: Korelace stínící účinnosti a povrchové rezistivity | 61 |
| Obrázek 24: Korelace stínící účinnosti a objemové rezistivity | 62 |
| Obrázek 25: Korelace mezi hmotností a efektivitou elektromagnetické stínící účinnosti SE | 63 |
| Obrázek 26: Korelace mezi stínící účinností a úrovní šedi | 65 |
| Obrázek 27: Úroveň šedi - nejvyšší a nejnižší hodnota [-]..... | 65 |
| Obrázek 28: Snímky z elektronového mikroskopu vodivých textilií - podélný pohled.. | 66 |
| Obrázek 29: Snímky z elektronového mikroskopu vodivých textilií - příčný pohled | 67 |
| Obrázek 30: Základní statistické charakteristiky stínící efektivity SE pro ověřování optimalizovaných vstupních úrovní faktorů | 70 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 31: Pravděpodobnostní graf stínící efektivity SE pro ověření vstupních optimalizačních úrovní faktorů | 70 |
| Obrázek 32: Závislost elektromagnetické stínící účinnosti na počtu vrstev vodivé textilie | 71 |
| Obrázek 33: Závislost počtu vrstev vodivých textilií na stínící efektivitě SE..... | 72 |
| Obrázek 34: Krabicový graf propustnosti pro vzduch | 73 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Souhrn doporučených limitů ICNIRP. Hodnoty uvedené v tabulce jsou expozice celého těla..... | 11 |
| Tabulka 2: Zdravotní rizika při expozici člověka neionizujícímu elektromagnetickému záření a elektrickým a magnetickým polím dle [2]..... | 15 |
| Tabulka 3: Spektrum elektromagnetických vln, rozdělení podle vlnových délek dle [1] | 17 |
| Tabulka 4: Třída I - Profesionální použití | 24 |
| Tabulka 5: Třída II - Obecné použití..... | 24 |
| Tabulka 6: Vlastnosti a popis primárních textilních vzorků..... | 44 |
| Tabulka 7: Účinnost elektromagnetického stínění SE textilních vzorků s nanesenou polypyrolovou vrstvou..... | 46 |
| Tabulka 8: Účinnost elektromagnetického stínění SE textilních vzorků s nanesenou polypyrolovou vrstvou s přepočtem na plošnou hmotnost | 46 |
| Tabulka 9: Složení nanosové pyrolové lázně | 51 |
| Tabulka 10: Výsledné průměrné hodnoty efektivit elmg. stínící účinnosti [dB]..... | 52 |
| Tabulka 11: Výstup analýzy rozptylu | 55 |
| Tabulka 12: Koeficienty úplného kvadratického modelu..... | 57 |
| Tabulka 13: Výsledky průměrné povrchové rezistivity [$M\Omega$]..... | 60 |
| Tabulka 14: Výsledky průměrné objemové rezistivity [$M\Omega \cdot \text{cm}$] | 61 |
| Tabulka 15: Výsledná průměrná hmotnost textilie [g]..... | 62 |
| Tabulka 16: Průměrná úroveň šedi pro každou kombinaci tří faktorů [-]..... | 64 |
| Tabulka 17: Efektivita elektromagnetické stínící účinnosti ovlivněná počtem vrstev.... | 71 |
| Tabulka 18: Základní statistické charakteristiky propustnosti pro vzduch pro ověřování optimalizovaných vstupních úrovní faktorů | 73 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| Symbol | Název | Jednotka |
|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| \vec{B} | Magnetická indukce | T |
| D_o, D_u | Dostava osnovy, útku | cm^{-1} |
| \vec{E} | Intenzita elektrického pole | $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ |
| f | Frekvence | Hz |
| I | Elektrický proud | A |
| l | Délka | m |
| R | Elektrický odpor | Ω |
| RS | Povrchový odpor | Ω |
| S | Plocha | m^2 |
| SE | Efektivita stínící účinnosti | dB |
| T | Jemnost | tex |
| λ | Vlnová délka | m |
| ρS | Plošná rezistivita | Ω |
| ρV | Objemová rezistivita | $\Omega \cdot \text{cm}$ |
| σ | Měrná elektrická vodivost | S |
| Zkratka | Název | |
| EMI | Elektromagnetické rušení | |
| EMP | Elektromagnetické pole | |
| EMC | Elektromagnetická kompatibilita | |
| ES | Elektromagnetické stínění | |
| IS | Interval spolehlivosti | |
| py | Pyrol | |
| ppy | Polypyrol | |

Příloha

Výsledky počátečního pokusu při volbě podkladové textilie

| <i>původní</i> | <i>Průměr</i> | <i>Povrchová rezistivita ρ_s [$k\Omega$]</i> | | | |
|------------------|---|--|------------|------------|------------|
| | <i>Plošná hmotnost (g/m^2)</i> | <i>12h</i> | <i>24h</i> | <i>48h</i> | <i>96h</i> |
| <i>Bavlna</i> | 174,4 | 409,98 | 220,92 | 109,07 | 187,33 |
| <i>Len</i> | 180,4 | 167,86 | 115,78 | 136,85 | 190,64 |
| <i>Vlna</i> | 201,6 | 102,52 | 47,99 | 45,39 | 162,84 |
| <i>Polyester</i> | 175 | 242,91 | 258,85 | 76,45 | 238,78 |
| <i>Viskóza</i> | 198,7 | 592,47 | 958,44 | 488,07 | 1789,69 |

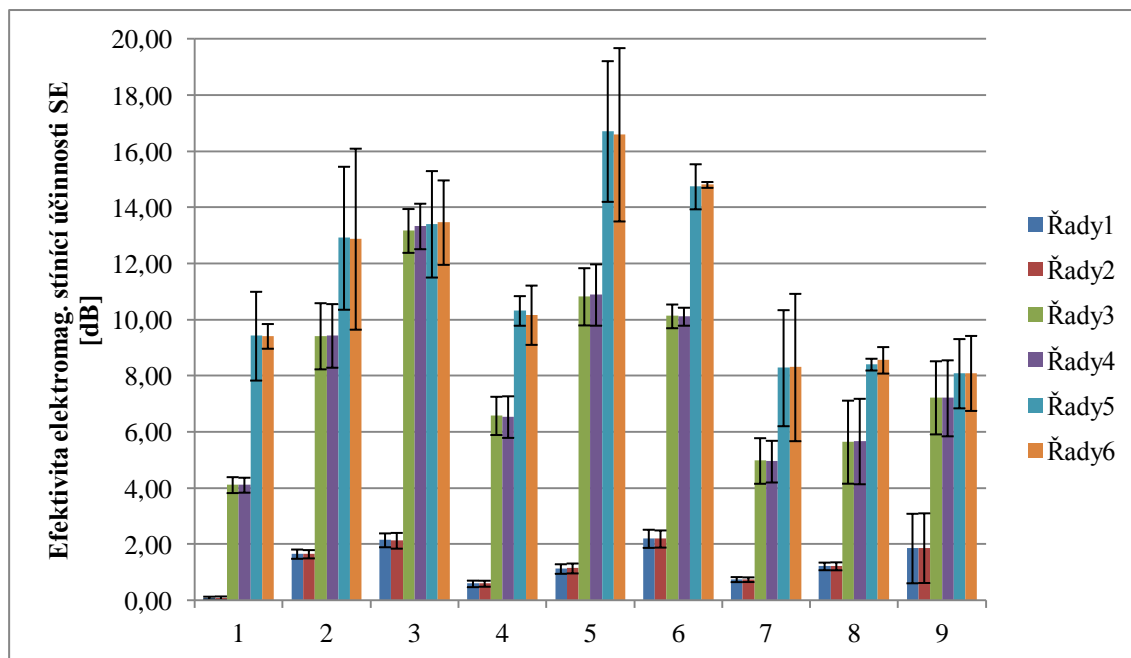
| <i>původní</i> | <i>Průměr</i> | <i>Objemová rezistivita [$k\Omega.cm$]</i> | | | |
|------------------|---|--|------------|------------|------------|
| | <i>Plošná hmotnost (g/m^2)</i> | <i>12h</i> | <i>24h</i> | <i>48h</i> | <i>96h</i> |
| <i>Bavlna</i> | 174,4 | 15904,48 | 11603,1 | 3697,82 | 10508,85 |
| <i>Len</i> | 180,4 | 3673,37 | 4562,15 | 1738,16 | 9203,07 |
| <i>Vlna</i> | 201,6 | 5020,75 | 4781,52 | 1281,21 | 7773,26 |
| <i>Polyester</i> | 175 | 18642,77 | 17865,06 | 5748,56 | 15946,74 |
| <i>Viskóza</i> | 198,7 | 58450,92 | 44758,74 | 24838,15 | 68300 |

Výsledky efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE pro plný faktoriální design

| Elektromag. stínění v dB při frekvenci 1,5 GHz | | A Teplota (°C) | | | | | | | | |
|---|------------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|------|------|
| | | 5 | | | 15 | | | 25 | | |
| | | <i>B</i> Čas (hod) | | | <i>B</i> Čas (hod) | | | <i>B</i> Čas (hod) | | |
| | | 1 | 8 | 15 | 1 | 8 | 15 | 1 | 8 | 15 |
| <i>C</i> koncentrace Py (ml) | | 1 | 8 | 15 | 1 | 8 | 15 | 1 | 8 | 15 |
| 0,2 | <i>lic</i> | 0,04 | 1,54 | 2,25 | 0,71 | 1,14 | 2,50 | 0,84 | 1,22 | 1,04 |
| | | 0,10 | 1,82 | 2,30 | 0,57 | 1,27 | 2,18 | 0,69 | 1,34 | 3,10 |
| | | 0,13 | 1,61 | 1,90 | 0,51 | 0,97 | 1,93 | 0,72 | 1,10 | 1,43 |
| | <i>rub</i> | 0,03 | 1,55 | 2,24 | 0,71 | 1,13 | 2,47 | 0,83 | 1,22 | 1,07 |
| | | 0,09 | 1,80 | 2,31 | 0,57 | 1,31 | 2,19 | 0,69 | 1,35 | 3,12 |
| | | 0,14 | 1,61 | 1,85 | 0,53 | 1,00 | 1,93 | 0,72 | 1,10 | 1,42 |
| 1 | <i>lic</i> | 4,13 | 9,69 | 12,39 | 6,08 | 10,78 | 9,70 | 4,71 | 4,52 | 8,53 |
| | | 3,86 | 8,27 | 13,44 | 6,42 | 9,95 | 10,32 | 5,79 | 7,08 | 6,35 |
| | | 4,36 | 10,30 | 13,69 | 7,25 | 11,75 | 10,37 | 4,43 | 5,34 | 6,80 |
| | <i>rub</i> | 4,13 | 9,80 | 12,51 | 5,98 | 10,77 | 9,79 | 4,74 | 4,50 | 8,56 |
| | | 3,87 | 8,30 | 13,68 | 6,38 | 9,99 | 10,27 | 5,69 | 7,14 | 6,28 |
| | | 4,34 | 10,20 | 13,81 | 7,26 | 11,91 | 10,29 | 4,43 | 5,37 | 6,79 |
| 1,8 | <i>lic</i> | 10,52 | 10,32 | 15,16 | 10,41 | 18,07 | 15,21 | 6,24 | 8,40 | 6,85 |
| | | 9,90 | 14,36 | 13,25 | 9,82 | 14,16 | 15,10 | 9,76 | 8,60 | 8,50 |
| | | 7,85 | 14,06 | 11,82 | 10,74 | 17,92 | 13,93 | 8,85 | 8,23 | 8,91 |
| | <i>rub</i> | 10,53 | 10,27 | 15,09 | 10,53 | 17,94 | 15,28 | 6,41 | 8,44 | 6,83 |
| | | 9,98 | 14,30 | 13,21 | 9,21 | 14,08 | 15,15 | 9,69 | 9,03 | 8,50 |
| | | 7,74 | 14,07 | 12,11 | 10,77 | 17,78 | 14,01 | 8,82 | 8,22 | 8,96 |

| Elektromag. stínění při frekvenci 1,5 GHz | | <i>A Teplota (°C)</i> | | | | | | | | |
|--|-------|---------------------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|------|------|
| | | 5 | | | 15 | | | 25 | | |
| | | <i>B Čas (hod)</i> | | | <i>B Čas (hod)</i> | | | <i>B Čas (hod)</i> | | |
| | | <i>C koncentrace Py</i> | | | | | | | | |
| Průměr [dB] | 0,2ml | 1 | 8 | 15 | 1 | 8 | 15 | 1 | 8 | 15 |
| | | 0,09 | 1,66 | 2,15 | 0,60 | 1,13 | 2,20 | 0,75 | 1,22 | 1,86 |
| | 1ml | 0,09 | 1,65 | 2,13 | 0,60 | 1,15 | 2,20 | 0,75 | 1,22 | 1,87 |
| | | 4,12 | 9,42 | 13,17 | 6,58 | 10,83 | 10,13 | 4,98 | 5,65 | 7,23 |
| | 1,8ml | 4,11 | 9,43 | 13,33 | 6,54 | 10,89 | 10,12 | 4,95 | 5,67 | 7,21 |
| | | 9,42 | 12,91 | 13,41 | 10,32 | 16,72 | 14,75 | 8,28 | 8,41 | 8,09 |
| Rozptyl [dB ²] | 0,2ml | 9,42 | 12,88 | 13,47 | 10,17 | 16,60 | 14,81 | 8,31 | 8,56 | 8,10 |
| | | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,08 | 0,01 | 0,01 | 1,20 |
| | 1ml | 0,00 | 0,02 | 0,06 | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 1,20 |
| | | 0,06 | 1,08 | 0,48 | 0,36 | 0,81 | 0,14 | 0,52 | 1,71 | 1,32 |
| | 1,8ml | 0,06 | 1,00 | 0,51 | 0,43 | 0,93 | 0,08 | 0,43 | 1,81 | 1,43 |
| | | 1,95 | 5,07 | 2,81 | 0,22 | 4,91 | 0,50 | 3,34 | 0,03 | 1,19 |
| Směrodatná odchylka [dB] | 0,2ml | 0,15 | 8,12 | 1,77 | 0,87 | 7,45 | 0,01 | 5,38 | 0,17 | 1,39 |
| | | 0,05 | 0,15 | 0,22 | 0,10 | 0,15 | 0,29 | 0,08 | 0,12 | 1,09 |
| | 1ml | 0,06 | 0,13 | 0,25 | 0,09 | 0,16 | 0,27 | 0,07 | 0,13 | 1,10 |
| | | 0,25 | 1,04 | 0,69 | 0,60 | 0,90 | 0,37 | 0,72 | 1,31 | 1,15 |
| | 1,8ml | 0,24 | 1,00 | 0,72 | 0,65 | 0,97 | 0,28 | 0,66 | 1,35 | 1,20 |
| | | 1,40 | 2,25 | 1,68 | 0,47 | 2,22 | 0,71 | 1,83 | 0,19 | 1,09 |
| Confidence [dB] | 0,2ml | 0,39 | 2,85 | 1,33 | 0,93 | 2,73 | 0,09 | 2,32 | 0,42 | 1,18 |
| | | 0,05 | 0,16 | 0,25 | 0,12 | 0,17 | 0,32 | 0,09 | 0,14 | 1,24 |
| | 1ml | 0,06 | 0,15 | 0,28 | 0,11 | 0,18 | 0,31 | 0,08 | 0,14 | 1,24 |
| | | 0,28 | 1,18 | 0,78 | 0,68 | 1,02 | 0,42 | 0,81 | 1,48 | 1,30 |
| | 1,8ml | 0,27 | 1,13 | 0,81 | 0,74 | 1,09 | 0,32 | 0,74 | 1,52 | 1,35 |
| | | 1,58 | 2,55 | 1,90 | 0,53 | 2,51 | 0,80 | 2,07 | 0,21 | 1,23 |
| IS horní [dB] | 0,2ml | 0,44 | 3,22 | 1,50 | 1,06 | 3,09 | 0,10 | 2,62 | 0,47 | 1,34 |
| | | 0,14 | 1,82 | 2,40 | 0,71 | 1,30 | 2,53 | 0,84 | 1,36 | 3,09 |
| | 1ml | 0,15 | 1,80 | 2,41 | 0,71 | 1,32 | 2,50 | 0,83 | 1,36 | 3,11 |
| | | 4,40 | 10,60 | 13,95 | 7,26 | 11,85 | 10,55 | 5,79 | 7,13 | 8,53 |
| | 1,8ml | 4,38 | 10,57 | 14,14 | 7,28 | 11,98 | 10,44 | 5,70 | 7,19 | 8,56 |
| | | 11,00 | 15,46 | 15,31 | 10,85 | 19,22 | 15,55 | 10,35 | 8,62 | 9,32 |
| IS dolní [dB] | 0,2ml | 9,86 | 16,10 | 14,97 | 11,23 | 19,69 | 14,92 | 10,93 | 9,04 | 9,43 |
| | | 0,04 | 1,49 | 1,90 | 0,48 | 0,96 | 1,88 | 0,66 | 1,08 | 0,62 |
| | 1ml | 0,02 | 1,51 | 1,85 | 0,50 | 0,97 | 1,89 | 0,66 | 1,08 | 0,63 |
| | | 3,83 | 8,24 | 12,39 | 5,90 | 9,81 | 9,71 | 4,16 | 4,17 | 5,92 |
| | 1,8ml | 3,85 | 8,30 | 12,52 | 5,80 | 9,80 | 9,80 | 4,21 | 4,15 | 5,86 |
| | | 7,84 | 10,37 | 11,51 | 9,80 | 14,21 | 13,94 | 6,22 | 8,20 | 6,85 |
| | | 8,98 | 9,66 | 11,97 | 9,11 | 13,51 | 14,71 | 5,68 | 8,09 | 6,76 |

Níže je vyobrazen sloupkový graf průměrných hodnot stínící účinnosti při frekvenci 1,5 GHz s chybovými úsečkami pro dokázání statistického rozdílu mezi lící a rubní stranou nově vytvořené vodivé textilie. Data odpovídají hodnotám průměrů a konfidence v tabulce výše.



Pozn. Řada = jeden řádek v tabulce.

Řada 1, 2 = průměrná hodnota efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE pro lící a rubní stranu textilie vytvořené při koncentraci **0,2ml** pyrolu.

Řada 3, 4 = průměrná hodnota efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE pro lící a rubní stranu textilie vytvořené při koncentraci **1ml** pyrolu.

Řada 5, 6 = průměrná hodnota efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE pro lící a rubní stranu textilie vytvořené při koncentraci **1,8ml** pyrolu.

Sloupec (1-9 na ose x) = jeden sloupec v tabulce.

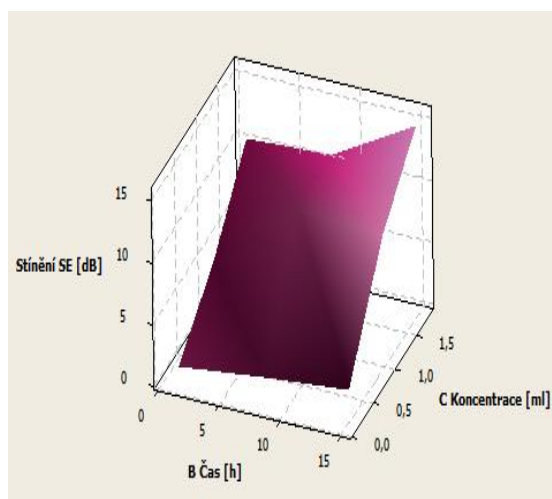
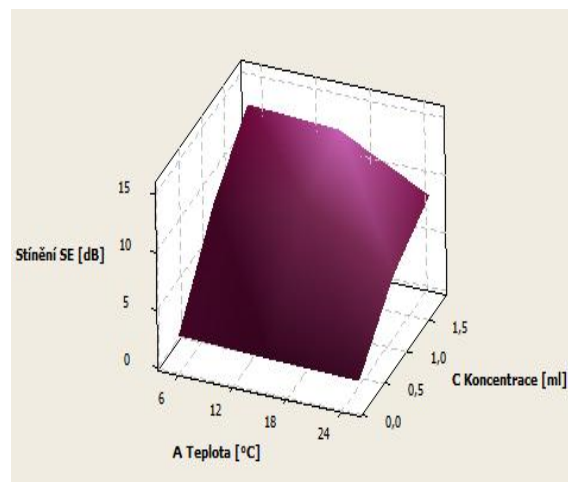
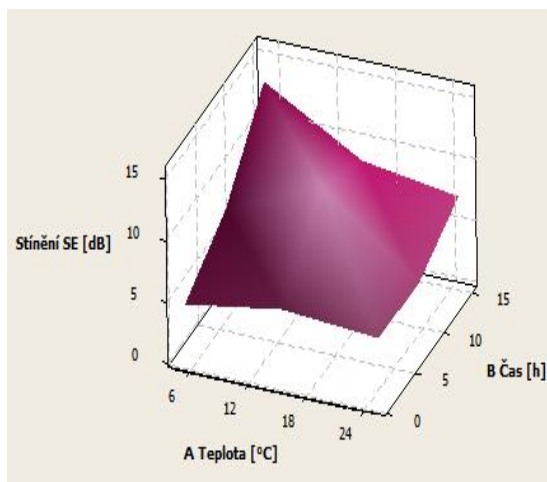
Sloupec 1, 2, 3 = průměrná hodnota efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE při **5°C** a polymeračním čase **1, 8 a 15 hodinách** zleva.

Sloupec 4, 5, 6 = průměrná hodnota efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE při **15°C** a polymeračním čase **1, 8 a 15 hodinách** zleva.

Sloupec 7, 8, 9 = průměrná hodnota efektivity elektromagnetické stínící účinnosti SE při **25°C** a polymeračním čase **1, 8 a 15 hodinách** zleva.

Lící a rubní strany jsou tedy vedle sebe, jejich chybové úsečky se překrývají – rozdíl není statisticky významný, hodnoty se neliší.

Responzní plochy vlivu faktorů na efektivitu elektromagnetické stínící účinnosti SE



Pozn. Vlevo nahoře je zobrazena závislost polymeračního času na teplotě, vpravo nahoře závislost koncentrace na teplotě a dole vztah mezi časem a koncentrací. Světlejší barva značí nejvyšší hodnoty stínící účinnosti SE.

Výsledek povrchové rezistivity pro plný faktoriální design při polymerizační teplotě
5°C

| Povrchová rezistivita [kΩ] | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|
| 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| 245754,00 | 1228,77 | 576,42 | 2517,48 | 448,55 | 142,86 | 992,01 | 602,40 | 260,74 |
| 421578,00 | 784,22 | 294,71 | 2197,80 | 86,91 | 372,63 | 1298,70 | 707,29 | 151,85 |
| 282717,00 | 580,82 | 755,24 | 16283,70 | 628,37 | 480,52 | 1188,81 | 691,31 | 312,69 |
| 482517,00 | 1978,02 | 885,11 | 2487,51 | 557,44 | 615,38 | 1648,35 | 521,48 | 261,74 |
| 303696,00 | 1878,12 | 328,67 | 1888,11 | 231,17 | 330,67 | 1038,96 | 776,22 | 240,76 |
| 344655,00 | 1318,68 | 865,13 | 1488,51 | 686,31 | 277,72 | 1068,93 | 685,31 | 181,82 |
| 40959,00 | 1308,69 | 812,19 | 2177,82 | 631,37 | 443,56 | 1308,69 | 525,47 | 108,89 |
| 31068,90 | 855,14 | 343,66 | 1988,01 | 844,16 | 214,79 | 1228,77 | 448,55 | 331,67 |
| 36463,50 | 723,68 | 639,36 | 17182,80 | 747,25 | 182,82 | 1978,02 | 506,49 | 202,80 |
| 33566,40 | 1548,45 | 697,30 | 12987,00 | 471,53 | 33,87 | 1438,56 | 611,39 | 461,54 |
| 32267,70 | 822,18 | 711,29 | 1358,64 | 930,07 | 62,94 | 1468,53 | 512,49 | 255,74 |
| 27572,40 | 1328,67 | 801,20 | 2267,73 | 305,69 | 74,93 | 1028,97 | 430,57 | 166,83 |
| 16583,40 | 1848,15 | 583,42 | 12987,00 | 434,57 | 311,69 | 927,07 | 680,32 | 345,65 |
| 22777,20 | 944,06 | 553,45 | 1218,78 | 680,32 | 41,96 | 1448,55 | 643,36 | 178,82 |
| 19780,20 | 1818,18 | 492,51 | 1998,00 | 236,76 | 245,75 | 1558,44 | 519,48 | 67,93 |
| 42557,40 | 1538,46 | 537,46 | 1898,10 | 972,03 | 550,45 | 1648,35 | 425,57 | 196,80 |
| 34265,70 | 930,07 | 362,64 | 1378,62 | 831,17 | 101,90 | 1178,82 | 498,50 | 212,79 |
| 47952,00 | 986,01 | 711,29 | 16883,10 | 208,79 | 485,51 | 1578,42 | 657,34 | 224,78 |

| | 1 hodina | | | 8 hodin | | |
|---------------------------------|---------------|-----------|---------|----------|---------|---------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [kΩ] | 137040,60 | 1245,58 | 608,39 | 5621,60 | 551,80 | 276,11 |
| Rozptyl [kΩ²] | 25718884448,6 | 196368,12 | 35473,7 | 39042924 | 70322,3 | 34030,6 |
| Sm.odch.[kΩ] | 160371,08 | 443,13 | 188,34 | 6248,43 | 265,18 | 184,47 |
| conf. [kΩ] | 74086,30 | 204,71 | 87,01 | 2886,58 | 122,51 | 85,22 |
| IS horní [kΩ] | 211126,90 | 1450,29 | 695,40 | 8508,17 | 674,31 | 361,33 |
| IS dolní [kΩ] | 62954,30 | 1040,86 | 521,38 | 2735,02 | 429,30 | 190,89 |

| | 15 hodin | | |
|---------------------------------|----------|----------|---------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [kΩ] | 1334,83 | 580,20 | 231,32 |
| Rozptyl [kΩ²] | 79745,48 | 11167,81 | 8529,18 |
| Sm.odch.[kΩ] | 282,39 | 105,68 | 92,35 |
| conf. [kΩ] | 130,46 | 48,82 | 42,66 |
| IS horní [kΩ] | 1465,29 | 629,02 | 273,99 |
| IS dolní [kΩ] | 1204,37 | 531,38 | 188,66 |

Výsledek povrchové rezistivity pro plný faktoriální design při polymerizační teplotě
15°C

| Povrchová rezistivita [kΩ] | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|--------|---------|---------|--------|----------|---------|---------|
| 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| 16983,00 | 2177,82 | 479,52 | 2017,98 | 777,22 | 57,94 | 1918,08 | 1808,19 | 487,51 |
| 1288,71 | 1808,19 | 505,49 | 2227,77 | 763,24 | 311,69 | 13286,70 | 1068,93 | 1358,64 |
| 2587,41 | 1075,92 | 843,16 | 1958,04 | 1438,56 | 82,92 | 2097,90 | 656,34 | 1318,68 |
| 14685,30 | 689,31 | 287,71 | 1928,07 | 771,23 | 134,87 | 1588,41 | 1478,52 | 656,34 |
| 18681,30 | 1168,83 | 781,22 | 1718,28 | 1008,99 | 113,89 | 1618,38 | 1128,87 | 582,42 |
| 15484,50 | 1868,13 | 344,66 | 1178,82 | 1188,81 | 307,69 | 2327,67 | 856,14 | 623,38 |
| 5644,35 | 2157,84 | 422,58 | 2077,92 | 725,27 | 65,93 | 2627,37 | 687,31 | 709,29 |
| 25874,10 | 890,11 | 771,23 | 1778,22 | 660,34 | 122,88 | 1988,01 | 1558,44 | 608,39 |
| 3626,37 | 1798,20 | 283,72 | 1688,31 | 892,11 | 66,33 | 10689,30 | 724,28 | 512,49 |
| 18181,80 | 918,08 | 674,33 | 1228,77 | 927,07 | 48,35 | 2057,94 | 888,11 | 757,24 |
| 2657,34 | 1097,90 | 291,71 | 1538,46 | 855,14 | 28,27 | 1358,64 | 1338,66 | 802,20 |
| 3156,84 | 1138,86 | 810,19 | 1478,52 | 952,05 | 45,95 | 1998,00 | 1528,47 | 818,18 |
| 21978,00 | 1438,56 | 532,47 | 1978,02 | 1108,89 | 185,81 | 1508,49 | 1238,76 | 776,22 |
| 23876,10 | 1258,74 | 502,50 | 2107,89 | 685,31 | 295,70 | 13086,90 | 1087,91 | 750,25 |
| 18981,00 | 1508,49 | 266,73 | 1948,05 | 937,06 | 54,95 | 12887,10 | 917,08 | 561,44 |
| 15984,00 | 1608,39 | 486,51 | 1998,00 | 826,17 | 47,95 | 1368,63 | 1518,48 | 767,23 |
| 3946,05 | 981,02 | 495,50 | 1988,01 | 795,20 | 59,64 | 1408,59 | 1218,78 | 686,31 |
| 17982,00 | 964,04 | 565,43 | 1708,29 | 999,00 | 147,85 | 2047,95 | 836,16 | 825,17 |

| | 1 hodina | | | 8 hodin | | |
|---------------------------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|---------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [kΩ] | 12866,57 | 1363,80 | 519,15 | 1808,19 | 906,20 | 121,03 |
| Rozptyl [kΩ²] | 70070454,16 | 203385,59 | 36245,64 | 87225,29 | 37989,42 | 8901,49 |
| Sm.odch.[kΩ] | 8370,81 | 450,98 | 190,38 | 295,34 | 194,91 | 94,35 |
| conf. [kΩ] | 3867,05 | 208,34 | 87,95 | 136,44 | 90,04 | 43,59 |
| IS horní [kΩ] | 16733,61 | 1572,14 | 607,10 | 1944,63 | 996,25 | 164,62 |
| IS dolní [kΩ] | 8999,52 | 1155,46 | 431,20 | 1671,75 | 816,16 | 77,45 |

| | 15 hodin | | |
|---------------------------------|-------------|-----------|----------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [kΩ] | 4214,67 | 1141,08 | 755,63 |
| Rozptyl [kΩ²] | 21076206,50 | 117136,73 | 55697,28 |
| Sm.odch.[kΩ] | 4590,88 | 342,25 | 236,00 |
| conf. [kΩ] | 2120,84 | 158,11 | 109,03 |
| IS horní [kΩ] | 6335,51 | 1299,19 | 864,66 |
| IS dolní [kΩ] | 2093,83 | 982,97 | 646,61 |

Výsledek povrchové rezistivity pro plný faktoriální design při polymerizační teplotě
25°C

| Povrchová rezistivita [kΩ] | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|--------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| 0,2ml | 1ml | 1,8 | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| 1988,01 | 1268,73 | 357,64 | 1928,07 | 926,07 | 634,37 | 2147,85 | 1288,71 | 587,41 |
| 2027,97 | 1188,81 | 247,75 | 2077,92 | 860,14 | 841,16 | 2537,46 | 992,01 | 440,56 |
| 2127,87 | 1035,96 | 786,21 | 1828,17 | 630,37 | 74,93 | 2357,64 | 926,07 | 168,83 |
| 12787,20 | 628,37 | 653,35 | 1678,32 | 932,07 | 446,55 | 2167,83 | 1068,93 | 352,65 |
| 13686,30 | 843,16 | 747,25 | 1628,37 | 884,12 | 347,65 | 1988,01 | 864,14 | 426,57 |
| 2557,44 | 1025,97 | 752,25 | 1528,47 | 764,24 | 267,73 | 2217,78 | 1091,91 | 530,47 |
| 11988,00 | 933,07 | 660,34 | 1318,68 | 446,55 | 616,38 | 1968,03 | 694,31 | 597,40 |
| 11888,10 | 926,07 | 730,27 | 1468,53 | 771,23 | 508,49 | 1558,44 | 431,57 | 455,54 |
| 2057,94 | 907,09 | 332,67 | 1268,73 | 790,21 | 496,50 | 1468,53 | 781,22 | 288,71 |
| 1968,03 | 712,29 | 540,46 | 1868,13 | 927,07 | 255,74 | 1848,15 | 622,38 | 748,25 |
| 1858,14 | 755,24 | 592,41 | 1578,42 | 842,16 | 368,63 | 1618,38 | 1011,99 | 388,61 |
| 2057,94 | 1278,72 | 627,37 | 1338,66 | 804,20 | 661,34 | 2197,80 | 983,02 | 255,74 |
| 13586,40 | 1158,84 | 662,34 | 1798,20 | 457,54 | 595,40 | 2037,96 | 866,13 | 112,89 |
| 1548,45 | 767,23 | 711,29 | 1027,97 | 724,28 | 688,31 | 1378,62 | 477,52 | 406,59 |
| 2047,95 | 803,20 | 471,53 | 1558,44 | 503,50 | 706,29 | 1768,23 | 663,34 | 373,63 |
| 1948,05 | 1218,78 | 298,70 | 1668,33 | 535,46 | 368,63 | 1788,21 | 792,21 | 203,80 |
| 1868,13 | 895,10 | 354,65 | 1798,20 | 648,35 | 326,67 | 1838,16 | 363,64 | 535,46 |
| 1958,04 | 1008,99 | 435,56 | 1588,41 | 711,29 | 481,52 | 1278,72 | 318,68 | 494,51 |

| | 1 hodina | | | 8 hodin | | |
|---------------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [kΩ] | 4997,22 | 964,20 | 553,45 | 1608,33 | 731,05 | 482,57 |
| Rozptyl [kΩ²] | 24917449,73 | 39147,73 | 31377,27 | 68120,08 | 26121,27 | 37707,00 |
| Sm.odch.[kΩ] | 4991,74 | 197,86 | 177,14 | 261,00 | 161,62 | 194,18 |
| conf. [kΩ] | 2306,02 | 91,40 | 81,83 | 120,57 | 74,66 | 89,71 |
| IS horní [kΩ] | 7303,24 | 1055,61 | 635,28 | 1728,91 | 805,71 | 572,28 |
| IS dolní [kΩ] | 2691,20 | 872,80 | 471,61 | 1487,76 | 656,38 | 392,87 |

| | 15 hodin | | |
|---------------------------------|-----------|----------|----------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [kΩ] | 1898,10 | 790,99 | 409,31 |
| Rozptyl [kΩ²] | 120370,66 | 74012,76 | 26719,05 |
| Sm.odch.[kΩ] | 346,94 | 272,05 | 163,46 |
| conf. [kΩ] | 160,28 | 125,68 | 75,51 |
| IS horní [kΩ] | 2058,38 | 916,67 | 484,83 |
| IS dolní [kΩ] | 1737,82 | 665,31 | 333,80 |

Výsledek objemové rezistivity pro plný faktoriální design při polymerizační teplotě 5°C

| Objemová rezistivita [$M\Omega cm$] | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|-------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|
| 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| 1412,46 | 678,30 | 68,63 | 710,22 | 81,80 | 7,02 | 67,03 | 37,71 | 14,32 |
| 1444,38 | 837,90 | 10,49 | 917,70 | 24,78 | 34,19 | 62,24 | 37,07 | 31,56 |
| 1444,38 | 76,21 | 19,71 | 106,53 | 20,31 | 26,01 | 79,00 | 25,82 | 23,02 |
| 1424,43 | 91,77 | 25,22 | 83,79 | 34,35 | 18,67 | 81,00 | 33,72 | 22,06 |
| 1847,37 | 67,43 | 69,83 | 670,32 | 79,00 | 34,07 | 73,42 | 27,49 | 28,81 |
| 1244,88 | 638,40 | 40,38 | 438,90 | 17,99 | 12,85 | 90,17 | 19,71 | 26,49 |
| 2194,50 | 61,05 | 27,97 | 530,67 | 81,40 | 20,87 | 42,69 | 32,04 | 32,32 |
| 1117,20 | 81,40 | 30,20 | 91,77 | 58,65 | 12,93 | 40,70 | 31,88 | 18,27 |
| 2054,85 | 67,83 | 17,04 | 646,38 | 27,49 | 22,86 | 52,27 | 27,69 | 35,19 |
| 4628,40 | 52,67 | 33,40 | 93,77 | 69,03 | 21,67 | 55,86 | 21,87 | 10,61 |
| 1077,30 | 68,63 | 13,69 | 81,40 | 74,61 | 13,77 | 77,01 | 17,20 | 16,80 |
| 1316,70 | 40,30 | 14,84 | 90,57 | 79,40 | 20,35 | 41,90 | 15,52 | 15,08 |
| 1117,20 | 104,14 | 49,48 | 578,55 | 69,03 | 21,47 | 58,25 | 14,60 | 17,80 |
| 957,60 | 84,19 | 26,13 | 142,84 | 28,93 | 27,65 | 84,19 | 15,76 | 24,90 |
| 1276,80 | 56,26 | 41,50 | 610,47 | 79,00 | 26,29 | 95,76 | 25,50 | 23,98 |
| 2154,60 | 57,86 | 26,65 | 94,16 | 66,63 | 14,40 | 70,62 | 29,77 | 5,51 |
| 877,80 | 81,40 | 38,50 | 754,11 | 73,02 | 17,52 | 53,47 | 29,09 | 11,09 |
| 1077,30 | 97,76 | 18,43 | 718,20 | 80,20 | 16,00 | 73,82 | 24,02 | 7,22 |

| | 1 hodina | | | 8 hodin | | |
|--|-----------|----------|--------|----------|--------|-------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [$M\Omega cm$] | 1592,68 | 180,19 | 31,78 | 408,91 | 58,09 | 20,48 |
| Rozptyl [$(M\Omega cm)^2$] | 733615,53 | 62866,77 | 297,72 | 91166,16 | 601,52 | 53,38 |
| Sm.odch. [$M\Omega cm$] | 856,51 | 250,73 | 17,25 | 301,94 | 24,53 | 7,31 |
| conf. [$M\Omega cm$] | 395,68 | 115,83 | 7,97 | 139,49 | 11,33 | 3,38 |
| IS horní [$M\Omega cm$] | 1988,36 | 296,02 | 39,75 | 548,39 | 69,42 | 23,85 |
| IS dolní [$M\Omega cm$] | 1196,99 | 64,36 | 23,81 | 269,42 | 46,76 | 17,10 |

| | 15 hodin | | |
|--|----------|-------|-------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [$M\Omega cm$] | 66,63 | 25,91 | 20,28 |
| Rozptyl [$(M\Omega cm)^2$] | 278,49 | 53,04 | 76,65 |
| Sm.odch. [$M\Omega cm$] | 16,69 | 7,28 | 8,76 |
| conf. [$M\Omega cm$] | 7,71 | 3,36 | 4,04 |
| IS horní [$M\Omega cm$] | 74,34 | 29,28 | 24,32 |
| IS dolní [$M\Omega cm$] | 58,92 | 22,55 | 16,24 |

Výsledek objemové rezistivity pro plný faktoriální design při polymerizační teplotě
15°C

| Objemová rezistivita [$M\Omega cm$] | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|
| 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| 128,08 | 28,57 | 17,80 | 79,40 | 38,02 | 1,66 | 119,30 | 69,03 | 6,06 |
| 99,75 | 33,24 | 20,11 | 63,84 | 57,46 | 2,91 | 117,31 | 67,43 | 5,35 |
| 93,37 | 42,33 | 23,58 | 92,17 | 61,45 | 5,91 | 722,19 | 29,41 | 14,92 |
| 666,33 | 39,62 | 25,66 | 85,79 | 57,06 | 5,55 | 61,05 | 56,26 | 17,80 |
| 534,66 | 31,40 | 8,94 | 111,32 | 29,69 | 4,99 | 74,21 | 29,33 | 15,48 |
| 57,46 | 27,57 | 19,51 | 100,15 | 23,50 | 6,14 | 97,76 | 67,03 | 21,59 |
| 562,59 | 19,67 | 23,02 | 84,19 | 33,60 | 2,78 | 85,79 | 64,64 | 26,17 |
| 550,62 | 98,95 | 30,04 | 102,94 | 30,96 | 2,55 | 81,40 | 65,44 | 30,92 |
| 598,50 | 18,07 | 27,61 | 109,73 | 32,28 | 1,84 | 74,61 | 63,84 | 19,75 |
| 786,03 | 32,44 | 16,72 | 95,36 | 39,22 | 2,99 | 88,18 | 54,26 | 2,71 |
| 734,16 | 29,57 | 21,07 | 86,58 | 25,78 | 1,39 | 84,99 | 50,67 | 1,99 |
| 618,45 | 83,79 | 31,16 | 81,40 | 29,21 | 1,16 | 82,99 | 38,62 | 2,03 |
| 127,68 | 27,49 | 21,11 | 106,13 | 32,16 | 6,74 | 138,85 | 60,65 | 5,63 |
| 782,04 | 30,36 | 22,50 | 100,55 | 12,49 | 2,59 | 93,37 | 45,89 | 9,34 |
| 114,91 | 32,76 | 30,04 | 61,85 | 26,45 | 2,51 | 85,39 | 42,69 | 17,84 |
| 698,25 | 58,65 | 25,26 | 56,66 | 22,38 | 1,64 | 120,90 | 20,15 | 16,44 |
| 237,80 | 30,52 | 19,47 | 119,30 | 24,90 | 2,15 | 114,91 | 26,57 | 13,33 |
| 746,13 | 15,92 | 20,15 | 111,32 | 23,22 | 2,87 | 458,85 | 37,87 | 10,93 |

| | 1 hodina | | | 8 hodin | | |
|--|----------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [$M\Omega cm$] | 452,04 | 37,83 | 22,43 | 91,59 | 33,32 | 3,24 |
| Rozptyl [$(M\Omega cm)^2$] | 79361,30 | 476,35 | 29,81 | 330,88 | 174,07 | 3,18 |
| Sm.odch. [$M\Omega cm$] | 281,71 | 21,83 | 5,46 | 18,19 | 13,19 | 1,78 |
| conf. [$M\Omega cm$] | 130,14 | 10,08 | 2,52 | 8,40 | 6,09 | 0,82 |
| IS horní [$M\Omega cm$] | 582,19 | 47,91 | 24,95 | 100,00 | 39,42 | 4,07 |
| IS dolní [$M\Omega cm$] | 321,90 | 27,75 | 19,91 | 83,19 | 27,23 | 2,42 |

| | 15 hodin | | |
|--|----------|--------|-------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [$M\Omega cm$] | 150,11 | 49,43 | 13,24 |
| Rozptyl [$(M\Omega cm)^2$] | 28107,25 | 259,05 | 71,01 |
| Sm.odch. [$M\Omega cm$] | 167,65 | 16,09 | 8,43 |
| conf. [$M\Omega cm$] | 77,45 | 7,44 | 3,89 |
| IS horní [$M\Omega cm$] | 227,56 | 56,87 | 17,13 |
| IS dolní [$M\Omega cm$] | 72,66 | 42,00 | 9,34 |

Výsledek objemové rezistivity pro plný faktoriální design při polymerizační teplotě
25°C

| Objemová rezistivita [$M\Omega cm$] | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|
| 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| 77,01 | 35,43 | 22,94 | 77,81 | 45,49 | 25,38 | 100,95 | 62,24 | 29,05 |
| 56,66 | 39,54 | 29,73 | 92,17 | 52,67 | 30,24 | 118,10 | 29,57 | 15,48 |
| 75,81 | 58,65 | 22,26 | 88,98 | 47,88 | 29,25 | 97,76 | 30,44 | 11,01 |
| 125,29 | 37,59 | 10,61 | 74,61 | 49,08 | 25,30 | 90,57 | 37,83 | 17,84 |
| 135,26 | 30,20 | 16,68 | 70,22 | 32,84 | 15,36 | 77,01 | 36,43 | 21,71 |
| 112,12 | 47,48 | 9,34 | 61,85 | 51,87 | 9,30 | 82,99 | 53,07 | 20,15 |
| 81,80 | 48,68 | 30,28 | 67,43 | 34,39 | 18,23 | 65,84 | 38,82 | 20,59 |
| 77,41 | 36,23 | 27,33 | 63,44 | 37,47 | 21,59 | 57,46 | 35,39 | 16,24 |
| 111,32 | 31,80 | 25,66 | 61,45 | 34,59 | 25,62 | 55,06 | 36,55 | 12,33 |
| 108,13 | 66,23 | 27,65 | 78,20 | 37,15 | 27,85 | 67,03 | 36,95 | 10,45 |
| 87,38 | 37,83 | 25,46 | 71,42 | 37,75 | 31,48 | 51,47 | 30,44 | 12,13 |
| 114,11 | 54,66 | 28,17 | 60,25 | 34,95 | 32,16 | 54,66 | 40,38 | 12,01 |
| 108,13 | 42,69 | 9,78 | 88,98 | 55,46 | 14,16 | 89,38 | 19,23 | 14,00 |
| 121,70 | 31,68 | 31,48 | 86,58 | 31,72 | 13,93 | 75,01 | 33,76 | 8,46 |
| 119,70 | 34,03 | 11,81 | 90,17 | 31,36 | 28,09 | 81,00 | 26,49 | 15,36 |
| 73,02 | 34,59 | 23,30 | 95,76 | 48,68 | 22,14 | 62,24 | 19,39 | 7,78 |
| 114,51 | 40,70 | 15,24 | 76,21 | 43,89 | 20,23 | 87,38 | 27,21 | 15,80 |
| 92,97 | 43,09 | 14,32 | 73,82 | 46,28 | 19,11 | 85,79 | 28,65 | 14,48 |

| | 1 hodina | | | 8 hodin | | |
|--|----------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [$M\Omega cm$] | 99,57 | 41,73 | 21,22 | 76,63 | 41,86 | 22,75 |
| Rozptyl [$(M\Omega cm)^2$] | 489,78 | 99,35 | 59,41 | 132,65 | 63,69 | 45,18 |
| Sm.odch. [$M\Omega cm$] | 22,13 | 9,97 | 7,71 | 11,52 | 7,98 | 6,72 |
| conf. [$M\Omega cm$] | 10,22 | 4,60 | 3,56 | 5,32 | 3,69 | 3,11 |
| IS horní [$M\Omega cm$] | 109,80 | 46,33 | 24,79 | 81,95 | 45,55 | 25,85 |
| IS dolní [$M\Omega cm$] | 89,35 | 37,12 | 17,66 | 71,31 | 38,17 | 19,64 |

| | 15 hodin | | |
|--|----------|--------|-------|
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| Průměr [$M\Omega cm$] | 77,76 | 34,60 | 15,27 |
| Rozptyl [$(M\Omega cm)^2$] | 336,31 | 109,64 | 27,43 |
| Sm.odch. [$M\Omega cm$] | 18,34 | 10,47 | 5,24 |
| conf. [$M\Omega cm$] | 8,47 | 4,84 | 2,42 |
| IS horní [$M\Omega cm$] | 86,23 | 39,44 | 17,69 |
| IS dolní [$M\Omega cm$] | 69,29 | 29,76 | 12,85 |

Výsledky hmotnosti textilie pro plný faktoriální design

| | 5°C | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------|------|-------|---------|------|-------|----------|------|-------|
| | 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| | 3,41 | 3,42 | 3,41 | 3,45 | 3,52 | 3,56 | 3,46 | 3,52 | 3,59 |
| | 3,39 | 3,48 | 3,42 | 3,4 | 3,48 | 3,67 | 3,39 | 3,59 | 3,51 |
| | 3,44 | 3,42 | 3,41 | 3,43 | 3,55 | 3,66 | 3,43 | 3,57 | 3,58 |
| Průměr [g] | 3,41 | 3,44 | 3,41 | 3,43 | 3,52 | 3,63 | 3,43 | 3,56 | 3,56 |
| Rozptyl [g²] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sm.odch. [g] | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Conf. [g] | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| IS horní [g] | 3,44 | 3,48 | 3,42 | 3,46 | 3,56 | 3,70 | 3,47 | 3,60 | 3,61 |
| IS dolní [g] | 3,38 | 3,40 | 3,41 | 3,40 | 3,48 | 3,56 | 3,39 | 3,52 | 3,51 |

| | 15°C | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------|------|-------|---------|------|-------|----------|------|-------|
| | 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| | 3,39 | 3,54 | 3,5 | 3,46 | 3,5 | 3,7 | 3,6 | 3,52 | 3,67 |
| | 3,4 | 3,47 | 3,5 | 3,39 | 3,56 | 3,77 | 3,53 | 3,6 | 3,7 |
| | 3,47 | 3,48 | 3,56 | 3,42 | 3,52 | 3,73 | 3,54 | 3,57 | 3,66 |
| Průměr [g] | 3,42 | 3,50 | 3,52 | 3,42 | 3,53 | 3,73 | 3,56 | 3,56 | 3,68 |
| Rozptyl [g²] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sm.odch. [g] | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |
| Conf. [g] | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,02 |
| IS horní [g] | 3,47 | 3,54 | 3,56 | 3,46 | 3,56 | 3,77 | 3,60 | 3,61 | 3,70 |
| IS dolní [g] | 3,37 | 3,45 | 3,48 | 3,38 | 3,49 | 3,69 | 3,51 | 3,52 | 3,65 |

| | 25°C | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------|------|-------|---------|------|-------|----------|------|-------|
| | 1 hodina | | | 8 hodin | | | 15 hodin | | |
| | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml | 0,2ml | 1ml | 1,8ml |
| | 3,42 | 3,54 | 3,47 | 3,51 | 3,47 | 3,6 | 3,46 | 3,58 | 3,59 |
| | 3,41 | 3,46 | 3,52 | 3,43 | 3,46 | 3,59 | 3,56 | 3,62 | 3,59 |
| | 3,43 | 3,48 | 3,47 | 3,47 | 3,56 | 3,6 | 3,54 | 3,61 | 3,55 |
| Průměr [g] | 3,42 | 3,49 | 3,49 | 3,47 | 3,50 | 3,60 | 3,52 | 3,60 | 3,58 |
| Rozptyl [g²] | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sm.odch. [g] | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,01 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| Conf. [g] | 0,01 | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,03 |
| IS horní [g] | 3,43 | 3,54 | 3,52 | 3,52 | 3,56 | 3,60 | 3,58 | 3,63 | 3,60 |
| IS dolní [g] | 3,41 | 3,45 | 3,45 | 3,42 | 3,43 | 3,59 | 3,46 | 3,58 | 3,55 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3,34 | 3,36 | 3,38 | 3,36 | 3,38 | 3,36 | 3,34 | 3,35 | 3,37 | 3,35 | 3,37 | 3,36 | 3,37 | 3,34 |
| <i>Průměr [g]</i> | 3,36 | Textilie bez nánosu | | | | | | | | | | | |
| <i>Rozptyl [g²]</i> | 0,00 | | | | | | | | | | | | |
| <i>Sm.odch. [g]</i> | 0,01 | | | | | | | | | | | | |
| <i>Conf. [g]</i> | 0,01 | | | | | | | | | | | | |
| <i>IS horní [g]</i> | 3,37 | | | | | | | | | | | | |
| <i>IS dolní [g]</i> | 3,35 | | | | | | | | | | | | |

Textilie bez nánosů

Výsledek propustnosti pro vzduch, měřené na textilních vzorcích připravených při
6,7°C, 10,4 hodinách a koncentraci 1,8ml pyroly

| <i>Propustnost pro vzduch [l/mm/s]</i> | | |
|--|----------------------------|---------------------------|
| <i>Číslo vzorku</i> | <i>Textilie bez nánosů</i> | <i>Textilie s nánosem</i> |
| <i>1</i> | 505 | 108 |
| <i>2</i> | 522 | 130 |
| <i>3</i> | 530 | 148 |
| <i>4</i> | 525 | 164 |
| <i>5</i> | 514 | 170 |
| <i>6</i> | 517 | 154 |
| <i>7</i> | 519 | 118 |
| <i>8</i> | 514 | 119 |
| <i>9</i> | 512 | 128 |
| <i>10</i> | 518 | 172 |
| <i>11</i> | 508 | 180 |
| <i>12</i> | 532 | 179 |
| <i>13</i> | 517 | 137 |
| <i>14</i> | 517 | 145 |
| <i>15</i> | 519 | 110 |